



**UNIVERSIDADE FEDERAL DOS VALES DO JEQUITINHONHA E MUCURI - UFVJM**

**Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal - PPGCF**

**Luciano Cavalcante de Jesus França**

**FRAGILIDADE AMBIENTAL POTENCIAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO  
JEQUITINHONHA, MINAS GERAIS, BRASIL**

**Diamantina, Minas Gerais**

**2018**

**Luciano Cavalcante de Jesus França**

**FRAGILIDADE AMBIENTAL POTENCIAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO  
JEQUITINHONHA, MINAS GERAIS, BRASIL**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, como requisito para obtenção do título de Mestre.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>a</sup> Danielle Piuzana Mucida

**Diamantina, Minas Gerais**

**2018**

Ficha Catalográfica – Serviço de Bibliotecas/UFVJM  
Bibliotecário Anderson César de Oliveira Silva, CRB6 – 2618.

F814f

França, Luciano Cavalcante de Jesus

Fragilidade ambiental potencial da bacia hidrográfica do rio  
Jequitinhonha, Minas Gerais, Brasil / Luciano Cavalcante de Jesus  
França. – Diamantina, 2018.

114 p.

Orientadora: Danielle Piuzana Mucida

Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Ciência  
Florestal) - Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri.

1. Conservação e restauração de ecossistemas. 2. Análise  
multicritério. 3. Manejo de ecossistemas. 4. Álgebra de mapas.  
5. Sistemas de Informações Geográficas. I. Mucida, Danielle Piuzana.  
II. Título. III. Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e  
Mucuri.

**CDD 333.7**

Elaborado com os dados fornecidos pelo (a) autor (a).

**LUCIANO CAVALCANTE DE JESUS FRANÇA**

**FRAGILIDADE AMBIENTAL POTENCIAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO  
JEQUITINHONHA, MINAS GERAIS, BRASIL**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre.

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Danielle Piuzana Mucida

Data de aprovação: 26/01/2018.

---

**Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Danielle Piuzana Mucida**

Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal - UFVJM

---

**Prof<sup>o</sup> Dr<sup>o</sup> Israel Marinho Pereira**

Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal - UFVJM

---

**Prof<sup>o</sup> Dr<sup>o</sup> Allaoua Saadi**

Departamento de Geografia do Instituto de Geociências - UFMG

**Diamantina, Minas Gerais**

**2018**



*Dedicado ao Vale do Jequitinhonha, sua gente, seus gestores!*



## **AGRADECIMENTOS**

Este trabalho é a realização de mais uma meta estabelecida na formação profissional. É neste contexto, que tenho a satisfação de agradecer às pessoas e instituições marcantes na trajetória deste mestrado desenvolvido, e que viabilizaram essa concretização.

Gratidão à Deus.

À minha família, em especial aos meus pais, Lucineide França, Manoel de França e minha irmã, Lucielma França.

À minha orientadora Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Danielle Piuzana, pelo incansável apoio, investimento, dedicação e confiança destinados a mim e à realização deste estudo.

À Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri – UFVJM, por meio do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal – PPGCF, pela oportunidade de compor seu quadro discente e aprender com seus doutores e mestres de elevada qualidade científica.

À Universidade do Porto, por meio do Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Ambiente, pelo acolhimento durante o mestrado sanduíche e a valiosa contribuição no aperfeiçoamento da minha investigação científica.

À Capes e UFVJM pela concessão da bolsa de estudo.

Aos meus verdadeiros amigos, que com certeza sabem quem são, sintam-se abraçados na certeza de amizades duradouras e valiosas.

À minha namorada, Elyzama Santos.

Muito obrigado!

## **BIOGRAFIA**

Luciano Cavalcante de Jesus França, filho de Lucineide Cavalcante de Jesus França e Manoel José de França, nascido em 7 de março de 1994, em Pedreiras, estado do Maranhão.

Cursou ensino fundamental na escola Unidade Integrada Colares Moreira, na cidade de Codó (MA), e ensino médio no Centro Educacional Despertar, ainda na mesma cidade.

Iniciou em 10 de março de 2011 o curso de graduação em Engenharia Florestal na Universidade Federal do Piauí (UFPI), em Bom Jesus (PI), concluindo-o em 5 de fevereiro de 2016.

Em abril de 2016, iniciou o Mestrado em Ciência Florestal na Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), em Diamantina (MG), onde obteve aprovação em primeiro lugar no processo de seleção, na área de Conservação e Restauração de Ecossistemas.

Em fevereiro de 2017 iniciou complementação do mestrado na Universidade do Porto, na cidade do Porto, Portugal, pelo Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Ambiente, da Faculdade de Ciências da referida instituição.

Ainda em 2017 obteve aprovação em segundo lugar em doutoramento na área de Manejo Florestal, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal de Lavras (UFLA), a ser desenvolvido a partir de 2018.

## RESUMO

A degradação ambiental em seu contexto geral é uma realidade presente em todo o Brasil, que vem desencadeando problemas de ordem ambiental, econômica e social, muitas vezes permanentes, outras contornáveis dado o avanço da pesquisa em restauração e conservação de ecossistemas degradados. Estudos de fragilidade ambiental potencial direcionam a compreensão da susceptibilidade à degradação em bacias hidrográficas, e podem auxiliar na priorização de áreas no planejamento ambiental, ordenamento territorial, restauração, conservação e preservação florestal e de solos. O objetivo desta investigação científica foi de realizar uma análise da fragilidade ambiental potencial da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha, na porção do estado de Minas Gerais. A metodologia utilizada foi baseada no estabelecimento de graus de fragilidade, de baixo à extremamente alto, a partir de avaliação multicritério de um conjunto de planos de informações ambientais: declividade do terreno, classes de solos, domínios geológicos, hierarquia de drenagens e pluviosidade. Aplicou-se o método de hierarquização para tomada de decisões e determinação da importância dos critérios por meio do *Analytic Hierarchy Process* (AHP), bem como a obtenção do índice e razão de consistência da matriz AHP. Para os procedimentos de análises em planilhas de dados, utilizou-se o *software* Excel, e para as análises em plataforma SIG, o *software* ArcGis 10.3.1. A classe de fragilidade ambiental potencial com maior representatividade é a denominada *média* fragilidade, e ocorre em uma extensão de 19.244,1 km<sup>2</sup>, equivalente a 30% da área total da bacia hidrográfica, que é de 66.319 km<sup>2</sup>. Uma área de 12.430,57 km<sup>2</sup> (19,4%) da bacia apresenta fragilidade *baixa*, 18.540,93 km<sup>2</sup> (28,9%) sob *levemente baixa*, e as classe *alta* e *extremamente alta*, representam 10.519,63 km<sup>2</sup> (16,4%) e 3.416,15 km<sup>2</sup> (5,3%), respectivamente. A Razão de Consistência (RC) calculada para a matriz de ponderação de hierarquização dos critérios para a álgebra de mapas, foi de 0,0781, dentro dos limites de coerência e confiabilidade aceitáveis pela metodologia AHP. A condição de maior ou menor fragilidade ambiental potencial, revela-se principalmente ao grau de proteção quanto a cobertura vegetal nativa, no contexto das formas de ocupação do território e impactos ambientais sob o qual a bacia hidrográfica está sujeita, condições que direcionam ou não à degradação dos solos. Destaca-se que, além dos resultados obtidos neste estudo, são necessárias outras investigações que complementem e testem a combinação de novos critérios, que englobem também distintos focos de aplicabilidade e tomadas de decisão nas ciências florestal, ambiental e agrária.

**Palavras Chave:** Conservação e Restauração de Ecossistemas; Análise Multicritério; Manejo de Ecossistemas; Álgebra de Mapas; Sistemas de Informações Geográficas (SIG).

## ABSTRACT

The environmental degradation in its general context is a reality present throughout Brazil, which has been unleashing environmental, economic and social problems, which are often permanent, others that are contrived due to the progress of research in restoration and conservation of degraded ecosystems. Potential environmental fragility studies guide the understanding of susceptibility to degradation in watersheds, and may assist in the prioritization of areas in environmental planning, land management, restoration, forest and soil conservation and preservation. The objective of this scientific investigation was to analyze the potential environmental fragility of the Jequitinhonha river basin in the state of Minas Gerais. The methodology used was based on the establishment of degrees of fragility, from low to extremely high, based on a multi-criteria assessment of a set of environmental information plans: terrain slope, soil classes, geological domains, drainage hierarchy and rainfall. The hierarchical method was applied for decision making and determination of the importance of the criteria through the *Analytic Hierarchy Process* (AHP), as well as obtaining the index and consistency ratio of the AHP matrix. For the analysis procedures in spreadsheets, the software Excel was used, and for the analyzes in platform GIS, the *software* ArcGis 10.3.1. The class of potential environmental fragility with greater representativeness is the denominated *average fragility*, and occurs in an extension of 19.244,1 km<sup>2</sup>, equivalent to 30% of the total area of the watershed, that is of 66.319 km<sup>2</sup>. An area of 12,430.57 km<sup>2</sup> (19.4%) of the basin presents *low fragility*, 18,540.93 km<sup>2</sup> (28.9%) under *slightly low*, and the upper and *extremely high* class represent 10,519.63 km<sup>2</sup> (16.4 %) and 3,416.15 km<sup>2</sup> (5.3%), respectively. The Consistency Ratio (RC) calculated for the hierarchy matrix of the criteria for map algebra was 0.0781, within the limits of coherence and reliability acceptable by the AHP methodology. The condition of greater or lesser potential environmental fragility is mainly due to the degree of protection of native vegetation cover, in the context of the forms of occupation of the territory and environmental impacts under which the river basin is subject, conditions that degradation of soils. In addition to the results obtained in this study, further research is required to complement and test the combination of new criteria, which also encompasses different foci of applicability and decision making in the forest, environmental and agrarian sciences.

**Keywords:** Conservation and Restoration of Ecosystems; Multicriteria Analysis; Management of Ecosystems; Map Algebra; Geographic Information Systems (GIS).

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b>	Esquema conceitual das fragilidades potencial e emergente a partir de análises multicritérios com álgebra de mapas em plataforma SIG (FRANÇA <i>et al.</i> , 2018, <i>in press</i> ).	24
<b>Figura 2.</b>	Localização da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha no contexto do estado de Minas Gerais, Brasil, sua organização hipsométrica com principais afluentes e bacias hidrográficas limítrofes.	28
<b>Figura 3.</b>	Fluxograma das etapas de processamento metodológico para geração do mapa de fragilidade ambiental em ambiente SIG.	45
<b>Figura 4.</b>	Pontos de localização dos sítios verificados em campo na bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha, Minas Gerais, Brasil.	46
<b>Figura 5.</b>	Mapa de declividade do terreno da bacia hidrográfica do Rio Jequitinhonha, MG, Brasil.	52
<b>Figura 6.</b>	Mapa de Classes de Solos presentes na bacia hidrográfica do Rio Jequitinhonha, MG, Brasil.	57
<b>Figura 7.</b>	Mapa de Precipitação Pluvial da Bacia do rio Jequitinhonha, MG, Brasil.	59
<b>Figura 8.</b>	Média do trimestre mais chuvoso na bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha (MG), entre 1977 e 2006.	60
<b>Figura 9.</b>	Média do trimestre mais seco na bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha (MG), entre 1977 e 2006.	61
<b>Figura 10.</b>	Mapa de classificação da Hierarquia de Drenagem da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha (MG).	63
<b>Figura 11.</b>	Mapa dos Domínios Geológicos da Bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha (MG).	65
<b>Figura 12.</b>	Relação das áreas em percentagem (%) e classes de fragilidade, com representação de linha de tendência do tipo polinomial, útil quando os dados flutuam, logo, quando há ganhas e perdas em determinado conjunto de dados.	71
<b>Figura 13.</b>	Mapa final de fragilidade ambiental potencial da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha, Minas Gerais.	72
<b>Figura 14.</b>	Mapa final de fragilidade ambiental potencial da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha, Minas Gerais (Setor Baixo Jequitinhonha).	73
<b>Figura 15.</b>	Zona semiárida (transição para domínio Caatinga) (A); Vistas para habitações em ‘grotões’ e áreas com solos expostos e (B) e (C); Solo exposto em Caatinga no Baixo Jequitinhonha (D); Zonas classificadas com <i>Alta</i> fragilidade ambiental (E) e (F) localizadas no Baixo Jequitinhonha, imediações de Medina.	74
<b>Figura 16.</b>	Zona com pastagens degradadas, vistas para ravinas de escoamentos superficiais (A); Solos expostos e declividades favoráveis à erosões (B) e (C); Transição para domínio Mata Atlântica (D), (E) e (F), em zona com manchas de <i>Alta</i> fragilidade ambiental.	75

<b>Figura 17.</b>	Mapa final de fragilidade ambiental potencial da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha, Minas Gerais (Setor Baixo Jequitinhonha).	76
<b>Figura 18.</b>	Vista para vertentes com início de processos erosivos provindos de escoamento superficial de áreas com solos expostos à degradados (A) e (B); Área com vegetação xerófita (C); Área de mineração, sítios próximos região do município de Jequitinhonha (D), (E) e (F).	77
<b>Figura 19.</b>	Mapa final de fragilidade ambiental potencial da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha, Minas Gerais (Setor Médio Jequitinhonha).	78
<b>Figura 20.</b>	Solo Exposto sobre vertente declivosa (A); Destaque para povoamentos de eucaliptos nas chapadas e comunidades nas baixadas (B) e (C); Áreas de reflorestamento comercial com espécies do gênero <i>Eucaliptos</i> spp. (D), (E) e (F). (Médio Jequitinhonha).	79
<b>Figura 21.</b>	Zonas de ‘chapadas’ ocupadas predominantemente por reflorestamento comercial (A), (B) e (C); Destaque para os processos de erosão regressiva junto às ‘chapadas’ (D); Manejo inadequado em plantio de café na região de Capelinha (MG) (E) e atividade pecuária (F). (Transição Médio para Alto Jequitinhonha).	80
<b>Figura 22.</b>	Mapa final de fragilidade ambiental potencial da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha, Minas Gerais (Setor Alto Jequitinhonha)	81
<b>Figura 23.</b>	Mapa final de fragilidade ambiental potencial da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha, Minas Gerais (Setor Alto Jequitinhonha).	82
<b>Figura 24.</b>	Vista para área de declividade acentuada e sob efeito de incêndios (A); Área com núcleo de vegetação mais adensada, nomeadamente “capões” (B); Vistas para conformação dos afloramentos rochosos predominantes na região do Alto Jequitinhonha (C) e (D).	83



## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b>	Cenas SRTM para a bacia do rio Jequitinhonha, Minas Gerais, Brasil.	33
<b>Tabela 2.</b>	Classificação da declividade quanto sua fragilidade ambiental (Ross, 1994).	34
<b>Tabela 3.</b>	Classes de fragilidade e seus respectivos pesos e descrições. (Adaptado de Scolforo <i>et al.</i> , 2008).	38
<b>Tabela 4.</b>	Escala fundamental referente à importância relativa a partir da comparação de critérios, adaptada de Saaty (1980).	41
<b>Tabela 5.</b>	Valores de IR (Índice Randômico) para matrizes de diferentes tamanhos (SAATY, 2005).	43
<b>Tabela 6.</b>	Relação entre classes de declividade, morfologia, processo de erosão e atividades impactantes – Adaptado de Embrapa (1979) e Granell-Peréz (2004).	49
<b>Tabela 7.</b>	Classes de Fragilidade atribuídas a Declividade do Terreno da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha (MG).	51
<b>Tabela 8.</b>	Áreas em quilômetro e percentagens referente às classes de solos da bacia hidrográfica do Rio Jequitinhonha, MG.	55
<b>Tabela 9.</b>	A tipologia dos solos quanto suas fragilidades (Adaptado de Ross, 1994).	56
<b>Tabela 10.</b>	Caracterização quanto a classificação da precipitação pluviométrica no contexto da fragilidade ambiental para a bacia do Rio Jequitinhonha (MG), Brasil.	59
<b>Tabela 11.</b>	Classificação da ordem dos canais de drenagem da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha (MG).	62
<b>Tabela 12.</b>	Pesos de fragilidade atribuídos às unidades geológico-ambientais presentes na bacia hidrográfica do Rio Jequitinhonha (MG).	64
<b>Tabela 13.</b>	Matriz de comparação pareada entre os parâmetros do estudo.	66
<b>Tabela 14.</b>	Pesos finais por ordem decrescente de importância, numéricos e em porcentagem, respectivamente.	67
<b>Tabela 15.</b>	Matriz comparativa do grupo de critérios (Com valores não fracionados).	67
<b>Tabela 16.</b>	Matriz comparativa normalizada do grupo de critérios	68

<b>Tabela 17.</b>	Cálculo do Vetor de Eigen (autovetores para cada parâmetro).	68
<b>Tabela 18.</b>	Cálculo do Eigen Principal ( $\lambda_{\text{Max}}$ ) – Autovalor principal	69
<b>Tabela 19.</b>	Classe de Fragilidade Ambiental Potencial para a bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha, Minas Gerais.	70
<b>Tabela 20.</b>	Graus de fragilidade ambiental potencial e cenários de potencial degradação ambiental na bacia do Rio Jequitinhonha, e propostas de conservação, recuperação e uso sustentável dos recursos.	84

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1.</b> Caracterização geral dos solos presentes na bacia do rio Jequitinhonha e associação com o tipo de relevo existente, de acordo com Amaral <i>et al.</i> , (2004).	53
---	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP – *Analytical Hierarchy Process*

FAP – Fragilidade Ambiental Potencial

PI – Planos de Informação

APP – Áreas de Preservação Permanente

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

UNCCD – United Nations Convention to Combat Desertification

GPS – *Global Positioning System*

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Km<sup>2</sup> – Quilômetro quadrado

MDE – Modelo Digital de Elevação

MDEHC – Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente

SIG – Sistemas de Informação Geográfica

UTM – *Universal Transversa de Mercator*

WGS 84 – *World Geodetic System 84*

CLP – Combinação Linear Ponderada

MCE – *Multi Criteria Evaluation*

RC – Razão de Consistência

IC – Índice de Consistência

SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission*

ESRI – *Environmental Systems Research Institute*

AMC – Avaliação Multi Critério

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	17
2.	OBJETIVOS .....	19
2.1.	Objetivo Geral.....	19
2.2.	Objetivos Específicos .....	19
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
3.1.	<i>Sistema de Informações Geográficas no ordenamento de territórios no âmbito de paisagens .....</i>	<i>20</i>
3.2.	O método da Fragilidade Ambiental.....	21
3.3.	Metodologia do <i>Analytic Hierarchy Process</i> (AHP) .....	24
4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
4.1.	<i>Caracterização da área de estudo .....</i>	<i>30</i>
4.2.	<i>Planos de Informações Geográficas .....</i>	<i>31</i>
4.2.1.	<i>Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente (MDHE) .....</i>	<i>31</i>
4.2.2.	<i>Plano de Informação: Declividade do Terreno.....</i>	<i>32</i>
4.2.3.	<i>Plano de Informação: Hierarquia fluvial .....</i>	<i>34</i>
4.2.4.	<i>Plano de Informação: Classes de Solos.....</i>	<i>35</i>
4.2.5.	<i>Plano de Informação: Pluviosidade .....</i>	<i>35</i>
4.2.6.	<i>Plano de Informação: Domínios Geológicos .....</i>	<i>36</i>
4.3.	<i>Processamento dos Dados.....</i>	<i>37</i>
4.3.1.	<i>Método Analytic Hierarchy Process (AHP) .....</i>	<i>39</i>
4.3.2.	<i>Razão de Consistência AHP.....</i>	<i>41</i>
4.3.3.	<i>Elaboração do mapa final de Fragilidade Ambiental Potencial (FAP).....</i>	<i>43</i>
4.3.4.	<i>Diagnósticos in situ .....</i>	<i>46</i>
5.	RESULTADOS.....	47
5.1.	Mapa de Declividade do Terreno .....	47
5.2.	Mapa de Classes de Solos .....	52
5.3.	Mapa de Pluviosidade.....	57
5.4.	Mapa da Hierarquia Fluvial .....	60
5.5.	Mapa dos Domínios Geológicos .....	63
5.6.	Resultados: <i>Analytic Hierarchy Process</i> (AHP).....	65
5.7.	Resultado: Razão de Consistência AHP .....	66

5.8.	Obtenção do mapa final de Fragilidade Ambiental Potencial (FAP) .....	69
6.	DISCUSSÃO .....	85
6.1.	Mapa de Declividade do Terreno .....	85
6.2.	Mapa de Classes de Solos .....	86
6.3.	Mapa de Pluviosidade.....	88
6.4.	Mapa da Hierarquia Fluvial .....	90
6.5.	Mapa dos Domínios Geológicos .....	91
6.6.	Processo de Hierarquia Analítica (AHP).....	92
6.7.	Razão de Consistência AHP .....	93
6.8.	Mapa final de Fragilidade Ambiental Potencial (FAP).....	94
7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	101
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	102

## 1. INTRODUÇÃO

As atividades antrópicas sobre os ecossistemas naturais tem sido motivo constante de preocupação ambiental, o que tem levado ao aumento de investigações científicas para avaliações de fatores degradativos e seus impactos ambientais, de tal forma a investigar-se ferramentas e tecnologias aplicadas a soluções de recorrentes problemáticas da degradação de ecossistemas.

Os cenários que apontam um declínio da biodiversidade para este século auxiliam na avaliação dos impactos decorrentes do desenvolvimento socioeconômico em relação aos serviços ecossistêmicos (PEREIRA *et al.*, 2010), uma vez que a exploração dos recursos naturais causa diferentes tipos de distúrbios no ambiente, em variadas proporções e com diferentes impactos, dependendo dos vários graus de resistência de cada ambiente. Quando um ambiente é explorado além da sua capacidade, um desequilíbrio estrutural é iniciado e vários tipos de danos começam a aparecer, como deslizamentos de terra, inundações, erosões, entre outros (DALLA CORTE *et al.*, 2015).

No estado de Minas Gerais, Brasil, dentre outras bacias hidrográficas relevante, é merecido destaque à bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha, dada sua extensão e relevância como recurso natural ao abastecer aproximadamente 70 municípios (FERREIRA; SAADI, 2013). Essa região, historicamente, sofre os efeitos das atividades antrópicas, como a exploração de novas áreas para fins agropecuários, garimpo, mineração, ocupação de áreas de preservação permanente e desflorestamentos para fins diversos. A procura pelo ouro e diamante no século XVII foi a principal causa da origem e do povoamento da região, especialmente no Alto Jequitinhonha. Contudo, com diminuição gradativa da exploração da atividade mineradora, a agropecuária assumiu maior espaço na economia, seguida da agricultura de subsistência e mais recentemente dá-se espaço às atividades silviculturais nas regiões de ‘chapadas’ (PTDRS, 2006).

O Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca (MMA, 2005) classifica as zonas susceptíveis à desertificação no estado de Minas Gerais, situadas no entorno das áreas semiáridas e subúmidas secas, em que compreendem 59 municípios, localizados principalmente nas regiões do Vale do Jequitinhonha e do norte do estado, no denominado Polígono das Secas. Desta maneira, parte da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha contextualiza-se no arcabouço definido como Áreas Susceptíveis à Desertificação (ASD), determinadas de acordo com os pressupostos norteadores da *United Nations Convention to Combat Desertification* – UNCCD. Tal inferência é reforçada por

Santana (2007) a partir da elaboração do Atlas das Áreas Susceptíveis à Desertificação do Brasil.

Neste cenário, verifica-se a necessidade por investigações e informações científicas de cunho geoespacial para esta região, dada sua relevância ecológica, social e econômica, sobretudo pelos processos degradativos aos quais está exposta. Desta forma, mapeamentos de fragilidade ambiental podem ser importantes ferramentas de gestão e ordenamento territorial e ambiental para a bacia do rio Jequitinhonha, uma vez que consiste no zoneamento do território em diferentes categorias hierárquicas. Estas possibilitam a definição de áreas mais e menos frágeis, ou seja, àquelas que podem apresentar maior ou menor susceptibilidade à degradação por mudanças que venham ocorrer na dinâmica natural do ambiente. O mapeamento da fragilidade potencial, busca determinar a capacidade do ambiente físico em sustentar intervenções antrópicas (ADAMI *et al.*, 2012).

A proposta metodológica de Ross (1994), que trata da “Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados” baseia-se na aplicação das concepções de ecodinâmica e ecossistema, elaborada por Tricart (1977) para uso em projetos de planejamento ambiental, no qual é associado os meios instáveis a áreas que sofrem intervenção antrópica e meios estáveis aquelas que encontram-se em seu estado natural, sem intervenção do homem. A metodologia para determinação da fragilidade ambiental com base na classe de declividade (ROSS, 1994) é bastante utilizada no meio científico. Todavia, trabalhos são realizados com adaptações visando obter resultados mais realísticos (SPORL; ROSS, 2004; SANTOS; SOBREIRA, 2008; MANGANHOTTO *et al.*, 2010; SANTOS *et al.*, 2010; MASSA; ROSS, 2012; JUNIOR *et al.*, 2014; SCHIAVO *et al.*, 2016).

Desta forma, para aumento da fidedignidade dessa metodologia de análise, a quantificação pode ser realizada recorrendo-se a ponderações, que são fundamentais para a obtenção de uma hierarquia final de importância por meio de um modelo de apoio à decisão multicritério, como o método do Processo de Análise Hierárquica (AHP - *Analytic Hierarchy Process*), proposto por Saaty (1980). O uso do método garante maior consistência das ponderações realizadas. Destaca-se que esta metodologia trata-se de um avanço em relação aos procedimentos convencionais de cruzamentos de planos de informações por meio de SIG, para a priorização de áreas (EASTMAN, 2006).

A hipótese deste estudo parte do pressuposto de que a análise multicriterial ao integrar os elementos naturais do ambiente, definem as relações de fragilidade ambiental da bacia hidrográfica. Com isso, execução dessa investigação científica partiu da adaptação metodológica de Ross (1994), a fim de determinar com eficiência os diferentes níveis de



fragilidade ambiental natural de terrenos à processos degradativos, na bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha.

## **2. OBJETIVOS**

### ***2.1. Objetivo Geral***

Caracterizar por meio de mapeamento em SIG, a fragilidade ambiental potencial da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha, porção de Minas Gerais, Brasil.

### ***2.2. Objetivos Específicos***

- Implementar o método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) na avaliação multicritério no contexto da Fragilidade Ambiental;
- Elaborar os mapas individuais dos fatores considerados na avaliação, com aplicação de metodologias específicas quando necessário;
- Analisar e discutir o mapa final de fragilidade ambiental e suas peculiaridades apresentadas na bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha (MG);
- Discutir aspectos quanto a susceptibilidade a degradação ambiental e capacidade de resiliência do solo em recuperar-se, assim como apresentar propostas para recuperação e uso sustentável dos recursos naturais.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. *Sistema de Informações Geográficas no ordenamento de territórios no âmbito de paisagens*

O conceito da paisagem é amplo e adaptável à contextos específicos, contudo, numa conceituação mais abrangente, a paisagem pode ser definida como um mosaico heterogêneo formado por unidades interativas, sendo esta heterogeneidade existente por pelo menos um fator, segundo um observador e numa determinada escala de observação, o que na abordagem “geográfica” da ecologia de paisagens, o conjunto interativo da paisagem é então composto por “ecossistemas” ou por unidades de “cobertura” ou de “uso e ocupação do território”, considerando-se escalas espaciais ou temporárias (METZGER, 2001). Aspecto diretamente relacionado quanto ao contexto do ordenamento territorial em suas distintas demandas intervencionistas no ambiente. D’Abreu (2007), destaca que o ordenamento do território envolve uma composição formal e funcional, tendo como objetivo organizar a distribuição de usos e funções no espaço e no tempo, como contribuição para o desenvolvimento integrado e sustentado das comunidades humanas. Quartaroli e Araújo (2014) reiteram quem o ordenamento territorial é usado para definir a disciplina científica, a técnica administrativa e as políticas públicas voltadas para organização da ocupação, uso e transformação do território, sua finalidade é promover melhores usos dos espaços de acordo com suas sustentabilidades ecológica, social e econômica.

Dentre as aplicações dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) na análise ambiental pode-se citar Mapeamento Temático, Diagnóstico Ambiental, Avaliação de Impactos Ambientais, Ordenamento e Gestão Territorial, além dos Prognósticos Ambientais (SILVA; MACHADO, 2014). Na Ecologia de Paisagens existem duas principais linhas de abordagens científicas: a *geográfica*, que estuda as influências antrópicas na paisagem como um todo e gestão do território; e a *ecológica*, que analisa o contexto espacial sobre os processos ecológicos, e a importância destas relações em termos de conservação biológica (METZGER, 2001), abordagens em que incluem-se análises que podem subsidiar e auxiliar decisões em projetos de conservação, manejo de ecossistemas e restauração florestal.

O uso dos SIG proporciona a interação e a análise dos diferentes planos de informação que caracterizam a paisagem (VALENTE; VETORAZZI, 2002). Dessa forma, facilita o processo de tomada de decisão, especialmente no que se refere às questões vinculadas ao planejamento e à organização do espaço geográfico (FITZ, 2008). As alterações causadas nas paisagens e sua representação espacial estão cada vez mais aperfeiçoadas, graças ao avanço e

uso destas ferramentas em geotecnologias, que são um conjunto de tecnologias voltadas à captação, armazenamento, manipulação e edição de dados georreferenciados. Análises espaciais baseadas no uso do geoprocessamento possuem uma vasta gama de aplicações, gerando subsídios para ações de manejo, planejamento ambiental e para diagnosticar alterações na paisagem e conflitos de uso do solo. É uma importante ferramenta técnica para a análise de fenômenos com expressão territorial, permitindo espacialização do território por meio da quantificação, qualificação e localização, bem como o relacionamento com outras variáveis espaciais (GIANUCA; TAGLIANI, 2012). Quartaroli e Araújo (2014) destacam que a capacidade dos SIG em organizar, processar e integrar dados geográficos de diferentes temas e origens e, sobretudo, a ampla capacidade desses sistemas em análise espacial e em modelagem, aliadas às suas ferramentas estatísticas, de classificação e de agrupamento tornam os SIG ferramentas imprescindíveis na identificação, na delimitação e na qualificação de zonas.

Ross (1994) já destacava que a análise de ambientes perturbados usando geotecnologias permitem a compreensão dos resultados do estudo por um amplo leque de profissionais em áreas relacionadas à ciência do meio ambiente, o que incluem as análises em fragilidades ambientais.

### **3.2. O método da Fragilidade Ambiental**

Investigações científicas sobre fragilidade ambiental de territórios tem sido desenvolvidas no Brasil a partir da proposta metodológica de Ross (1994), que originalmente trata da “Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados”, onde fundamentado na aplicação das concepções de ecodinâmica e ecossistema, elaborada por Tricart (1977) para uso em projetos de planejamento ambiental, que trata dos meios instáveis a áreas que sofrem intervenção antrópica e meios estáveis aquelas que encontram-se em seu estado natural, sem intervenção humana.

Integrante ao conceito de fragilidade ambiental, destacam-se dois termos distintos envolvidos, sendo eles: a *fragilidade potencial* e a *fragilidade emergente* (ROSS, 1994). Em concordância à Schiavo *et al*, (2016), a fragilidade potencial de uma determinada área é conceituada como sendo a susceptibilidade natural de um ambiente em função de suas características físicas como a declividade, índice de pluviosidade, tipo de solo, entre outros, enquanto que a fragilidade emergente além de considerar as características físicas, contempla também, os graus de proteção dos diferentes tipos de uso e cobertura vegetal e do território sobre o ambiente, conforme a metodologia apresentada.

A fragilidade potencial, diferente da fragilidade emergente, representa fatores intrínsecos à paisagem, enquanto a fragilidade emergente considera também a cobertura da terra e intervenções humanas (VALLE *et al.*, 2016). O estudo destas variáveis possibilita a definição das classes de fragilidades naturalmente potenciais à erosão e movimentação dos solos, que, se sujeitos a ações antropogênicas, apresentar-se-ão em condições de instabilidade ambiental.

Tamanini (2008) reitera que o conceito de fragilidade ambiental diz respeito à vulnerabilidade do ambiente em sofrer qualquer tipo de dano, ou seja, relaciona-se com fatores de desequilíbrio de ordem tanto natural (expresso pela própria dinâmica do ambiente), como em situações de elevadas declividades e alta susceptibilidade erosiva dos solos, quanto antropogênica (uso inadequado da terra e de intervenções em regimes fluviais). Daí a definição de ecossistemas ou áreas frágeis como àqueles que, por suas características, são particularmente sensíveis aos impactos ambientais adversos, de baixa resiliência e pouca capacidade de recuperação.

A metodologia para determinação da fragilidade ambiental com base na classe de declividade (Ross, 1994) é a mais utilizada no meio científico. Todavia, investigações científicas têm sido realizadas ao longo dos anos com adaptações visando obter resultados mais realísticos e inclusão de novos critérios (SPORL; ROSS, 2004; VASHCHENKO *et al.*, 2007; SANTOS; SOBREIRA, 2008; SANTOS *et al.*, 2010; GONÇALVES *et al.*, 2011; MANGANHOTTO *et al.*, 2011; ADAMI *et al.*, 2012; MASSA; ROSS, 2012; PADILHA *et al.*, 2014; JUNIOR *et al.*, 2015; SCHIAVO *et al.*, 2016; FRANÇA *et al.*, 2017; TRAFICANTE *et al.*, 2017).

Rosa e Ross (1999) apresentam uma das primeiras aplicações de SIG para mapeamento ambiental de fragilidade, usando álgebra de mapa e variáveis como os tipos de solo, geomorfologia, cobertura vegetal e mapa de declividade para gerar potencialidades ambientais e mapas de fragilidades.

Desse modo, torna-se evidente que estudos de fragilidade ambiental proporcionam melhor definição das diretrizes e ações a serem implantadas no espaço físico-territorial, servindo de base para o zoneamento ambiental e fornecendo subsídios à gestão do território (SPORL; ROSS, 2004). Destaca-se que conhecer áreas menos ou mais vulneráveis à processos de degradação é de suma importância para as instituições governamentais e de pesquisa na área de restauração de ambientes degradados.

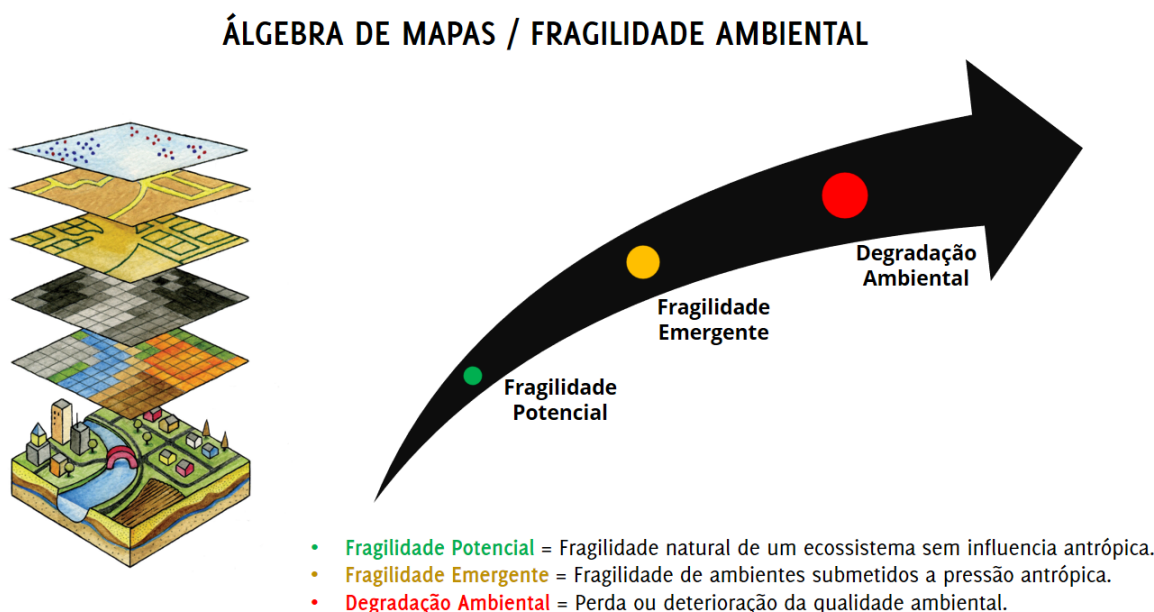
A degradação dos solos, ocasionada por diferentes processos, conduzem a perda de nutrientes e matéria orgânica, conseqüentemente ao aumento de acidez e/ou compactação de solos ou substratos. A partir dessa fase é que processos erosivos tornam-se evidentes, levando

além da degradação física e química, à degradação biológica, que consiste no processo final no qual há uma intensa diminuição da capacidade de produção de biomassa vegetal (WADT, 2003).

Os procedimentos para obtenção da fragilidade ambiental de uma determinada área são frutos da álgebra de mapas, método utilizado em Geoprocessamento que considera conjuntos de informações de diversos campos geográficos por meio do cruzamento espacial de tais variáveis (Figura 1). Para o uso desta técnica necessita-se de uma estrutura computacional, neste caso o Sistema de Informações Geográficas (SIG), cujo resultado por meio da álgebra de mapas, acarretará em decisões e valores obtidos pelas operações que, sistematizados e espacializados, alcançam o objetivo da análise espacial (SANTOS *et al.*, 2010). A fragilidade ambiental pode ser considerada, portanto, o prognóstico da susceptibilidade de uma determinada área apresentar degradação ambiental.

Deodoro e Fonseca (2016) destacam que análise de multicritérios é um procedimento metodológico utilizado em análises espaciais que consiste no cruzamento de variáveis, também conhecida como Árvore de Decisões ou como Análise Hierárquica de Pesos, e a álgebra de mapas a consistir no procedimento de combinação de variáveis que apoia a análise de multicritérios.

**Figura 1.** Esquema conceitual das fragilidades potencial e emergente a partir de análises multicritérios com álgebra de mapas em plataforma SIG (FRANÇA *et al.*, 2018, *in press*).



FRANÇA *et al.* (2018, *in press*) ressaltam que, para cada um dos parâmetros analisados são estabelecidas classes de fragilidades, conforme o estudo individual de suas características, pesos de 1 a 5 para cada parâmetro, representando nomeadamente as categorias: 1 (*Baixa*), 2 (*Levemente Baixa*), 3 (*Média*), 4 (*Alta*) e 5 (*Extremamente Alta*), em conformidade com classificação recomendada por Ross (1994).

### 3.3. Metodologia do *Analytic Hierarchy Process* (AHP)

Existem, disponíveis atualmente, vários modelos e operadores para determinação da fragilidade ambiental, dentre eles o Processo Analítico Hierárquico ou *Analytic Hierarchy Process* (AHP), que inclui a análise por múltiplos critérios (*Multi Criteria Evaluation* – MCE). Quadros (2014), destaca que a análise multicriterial contempla ainda o método de Combinação Linear Ponderada (CLP), que padroniza os valores para uma escala numérica comum, nela, os fatores recebem pesos e são combinados por meio de uma matriz de comparação pareada entre os fatores, de acordo com a importância relativa entre os pares de fatores, sendo o resultado um mapa de prioridades.

As análises de fragilidade ambiental, em sua grande maioria, têm sido desenvolvidas convencionalmente por meio da álgebra de mapas, a partir de uma padronização de valores para uma escala numérica comum, tomando por base a classificação de Ross (1994), com a escala de fragilidade de 1 a 5. Entretanto, para o aumento da fidedignidade dessa metodologia de análise, a quantificação pode ser realizada recorrendo-se a determinação de pesos de importância para cada fator considerado na análise, de modo a considerar o fato de que, os fatores não apresentam o mesmo peso de relevância quando em análise conjunta convencional, e requerem ponderação operacional estatística, que são fundamentais para a obtenção de uma hierarquia final de importância por meio de um modelo de apoio à decisão multicritério. Neste caso utiliza-se o método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) proposto por Saaty (1980). O uso do método garante maior consistência das ponderações realizadas. Destaca-se que esta metodologia trata-se de um avanço em relação aos procedimentos convencionais de cruzamentos de planos de informações por meio de SIG, para a priorização de áreas (EASTMAN, 2006).

Desta forma, o método AHP baliza e divide os graus importância envolvidos nos parâmetros considerados no estudo, enquanto ao mesmo tempo, a participação dos fatores de menores importâncias, é mantida na decisão global, por considerar que há uma relevância envolvida, que necessita estar na análise multicritério, contudo com seu peso relativo de importância atribuído.

Segundo Saaty (1980) o Método AHP é uma técnica de análise de decisão e planejamento de múltiplos critérios, cuja aplicação reduz o estudo de sistemas complexos a uma sequência de comparações aos pares de componentes adequadamente identificados. A técnica tem sido amplamente aplicada na atribuição dos pesos para a tomada de decisão. Albano e Feck (2016) fazem destaque que o AHP é o método mais amplamente utilizado e conhecido no meio científico, no apoio à tomada de decisão na resolução de conflitos negociados, em problemas com múltiplos critérios.

Nesse procedimento, os diferentes fatores que influenciam a tomada de decisão são comparados ‘dois-a-dois’, e um critério de importância relativa é atribuído ao relacionamento entre esses fatores, conforme uma escala predefinida (INPE, 2005). A técnica baseia-se numa matriz quadrada ‘ $n \times n$ ’, onde as linhas e colunas correspondem aos critérios analisados para o problema em questão. Assim, o valor de cada célula da matriz representa a importância relativa do critério da linha face ao critério da coluna (MIARA; OKA-FIORI, 2007).

Para a aplicação do método de decisão multicritério, realiza-se a concatenação de todos os mapas de fatores gerados. A ferramenta de álgebra de mapas permite a execução da operação. Logo, é realizada a análise de confronto entre os fatores, com a finalidade de se gerar os pesos de importância. Este método é aplicável a situações que envolvem julgamentos subjetivos e utiliza tanto dados quantitativos como qualitativos. Para tanto, elabora-se uma matriz de análise par a par, resultando nos pesos atribuídos a cada camada. Logo, procede-se com a soma ponderada de todas as camadas com base nos resultados de uma matriz matemática que apresentou os fatores por grau de importância (SAATY, 2008).

O grau de consistência será satisfatório, segundo Saaty (1980; 2005), quando os valores de RC forem inferiores a 0,1. Quando encontrados valores de RC superiores a 0,1 (10%), o autor recomenda reavaliar melhor os dados levantados junto aos especialistas, verificando se não houve equívocos ou erros durante o processo de levantamento. A Razão de Consistência AHP permite analisar, determinar e decidir os diversos critérios que influem na tomada de decisão e, conseqüentemente, gerar informações que auxilie o decisor a escolher a melhor das alternativas propostas, com base nos critérios analisados. Mais do que determinar a decisão correta, o método permite justificar a escolha de forma consistente e coerente (SANTOS; CRUZ, 2013). Este método calcula um conjunto de pesos e uma relação de consistência, permitindo ajustes repetidos na comparação (MARTINS *et al.*, 2014)

De acordo com Saaty (1991) o método AHP aproveita a capacidade humana de fazer julgamentos, ou seja, mesmo quando duas variáveis são incomparáveis, com o conhecimento e

a experiência técnico-científico de analistas, pode-se reconhecer qual dos critérios é mais importante.

Diante do exposto, na aplicabilidade e benefícios do método AHP, é, portanto, necessário reconhecer as limitações do método, sendo uma das principais, a maior facilidade de aplicação inadequada, ou seja, em ambientes desfavoráveis onde a aplicação é percebida como simplificação excessiva ou como desperdício de tempo, destaca Grandzol (2005). O mesmo autor, ainda afirma que, por reconhecer que participantes podem estar incertos ou fazer julgamentos pobres em algumas comparações, o método de Saaty envolve comparações redundantes para melhorar a validade destas.

Apesar das limitações e dúvidas levantadas sobre a AHP, ela apresenta vários benefícios, onde um dos principais é fato que ela permite que um tomador de decisão possa concentrar sua atenção no desenvolvimento de uma estrutura decisória (KARLSSON *et al.*, 2017).

#### ***3.4. Aspectos Fisiográficos e Domínios Fitoecológicos da Bacia Hidrográfica do Rio Jequitinhonha***

O rio Jequitinhonha nasce na Serra do Espinhaço, no município do Serro, Minas Gerais, uma altitude aproximada de 1.300 metros. A bacia do rio Jequitinhonha limita-se a norte com a bacia do rio Pardo, a sul com a bacia do rio Doce, a sudeste com a do Mucuri e várias outras pequenas bacias independentes (Sucuruçu, Itanhém, Buranhém e Peruípe). A oeste limita-se com a bacia do rio São Francisco e a leste atravessa o limite entre Minas Gerais e Bahia no município de Salto da Divisa e segue rumo ao Oceano Atlântico. A área total da bacia é de 70.315 km<sup>2</sup>, dos quais 65.660 km<sup>2</sup> (93,38%) correspondem à porção mineira e 4.655 km<sup>2</sup> (6,62%) estão no território do estado da Bahia (FERREIRA, 2011).

Quanto ao clima, a bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha possui características climáticas que variam do clima semiárido a úmido, com totais pluviométricos anuais compreendidos entre 600 e mais de 1.600 mm, que concentram-se basicamente em seis meses do ano (outubro a março). A temperatura média anual acusa pouca variação, situando-se na faixa de 21 a 24°C e a evapotranspiração potencial situa-se na faixa entre 800 e 1.200 mm (IBGE, 1997; FERREIRA; SILVA, 2012). Quanto a classificação climática de Köppen, Sá Júnior (2009) cita que, dentre as mesorregiões de Minas Gerais, a do Jequitinhonha é a que apresenta os maiores contrastes climáticos, sendo a única a apresentar todas as cinco classes climáticas observadas no estado. Contudo com uma maior representatividade da classe Aw (Clima tropical de savana com estação seca de inverno) com aproximadamente 77% da área



total da mesorregião. Bem com apresenta ainda a classe Am (Clima tropical de monção), BSh (Clima de estepe quente), Cwa (Clima temperado úmido com inverno seco e verão quente) e Cwb (Clima temperado úmido com inverno seco e verão moderadamente quente).

Em relação aos aspectos socioeconômicos, Ferreira e Saadi (2013) ressaltam que a bacia do rio Jequitinhonha tem sido objeto de sucessivos planos e intervenções gerenciais idealizados no sentido da busca de superação do seu subdesenvolvimento. Os fracassos generalizados das iniciativas e a consequente permanência de um quadro de atraso econômico criaram um cenário representativo em relação aos desafios impostos ao Brasil no que se refere à gestão de recursos naturais e às expectativas regionais de desenvolvimento

Quanto a paisagem natural, o diagnóstico ambiental da bacia do rio Jequitinhonha, elaborado pelo IBGE (1997) destacam nove Domínios Fitoecológicos e Áreas de Contato, são eles:

- *Domínio Fitoecológico da Floresta Ombrófila*, caracterizada atualmente por remanescentes florestais, ocorre no Baixo Vale do Jequitinhonha em áreas de planícies, em superfícies tabulares designadas tabuleiros e em relevo dissecado de forma topo convexo, em áreas que abrangem municípios de Bandeira e Mata Verde. As áreas deste domínio encontram-se muito fragmentadas devido a atividade antrópica, sendo uso do terreno caracterizado por extensas pastagens. O clima é tipicamente úmido e úmido a sub-úmido. A altura pluviométrica situa-se na faixa de 1.300 a mais de 1.600 mm, com as chuvas concentradas no período de outubro a março, quando registram-se aproximadamente 70% da pluviometria total;
- *Domínio Fitoecológico da Floresta Estacional*, onde as pastagens ocupam grandes extensões anteriormente revestidas de vegetação florestal primitiva, tendo os trechos ainda preservados da floresta ocorrendo nos conjuntos maiores de relevos dissecados, ocupando ainda baixas encostas e fundos de vales mais resguardados. As características climáticas são muito variáveis, abrangendo climas sub-úmido a semiárido, e semiárido. As precipitações situam-se entre 800 e 1.100 mm, concentradas no período de outubro a março, quando são registrados cerca de 80% do total anual precipitado. Ocorre principalmente nas zonas de Divisa, Rio do Prado, Pedra Azul, Almenara, Novo Cruzeiro.

- O *Domínio Fitoecológico do Cerrado*, apresenta fitofisionomia com demasiada descaracterização com derrubadas de indivíduos arbóreos para aproveitamento de lenha para carvão. Reflorestamentos comerciais substituíram grandes trechos do cerrado original nas superfícies planas das chapadas. A área encontra-se sob a dominância do clima úmido a sub-úmido, transicionando para sub-úmido a semiárido. A pluviometria situa-se na faixa dos 900 a 1.300 mm, com chuvas concentradas no período de novembro a março. Predominantemente ocorrente no alto Jequitinhonha e na região dos planos retocados da sub-bacia do rio Itacambirucu, onde o cerrado mistura-se aos restos de matas-de-galeria que se desenvolveram junto aos canais de drenagem.
- *Domínio Fitoecológico da Caatinga*, em geral mais poupada que o cerrado, a caatinga também mostra os efeitos das atividades de extração de lenha. Grande setor da depressão do Jequitinhonha é revestido de densa caatinga arbustiva. Condições pedológicas específicas em trechos localizados induziram o desenvolvimento de uma fitomassa mais exuberante, de porte arbóreo. O clima é o semiárido, com pluviometria média anual inferior a 700 mm, com chuvas concentradas de novembro a janeiro. As regiões de Itaobim e Itinga são os principais indicadores climáticos. Ocorrência preponderante na região do médio Jequitinhonha, trecho compreendido entre a foz do rio Araçuai e a cidade de Jequitinhonha.
- *Áreas de Contato Floresta Estacional / Cerrado*, extensa área de enclave onde ocorrem espécies das duas fitofisionomias, sem que se possa delimitá-las espacialmente em função da escala de mapeamento ocorrendo, no entanto, dominância das espécies florestais. A área abrange relevos estruturais nas bordas do Espinhaço e os modelados profundamente erodidos dos ‘sopés’ das ‘chapadas’. Acha-se sob o domínio dos climas úmido a sub-úmido e sub-úmido a semi-rido com pluviometria total anual na faixa de 700 a 1.300 mm, concentradas no período de outubro a março. Ocorrência preponderante nos Patamares Dissecados do Espinhaço e Planalto Dissecado do Alto Jequitinhonha;
- *Áreas de Contato Floresta Estacional / Caatinga*, setor de enclave das espécies de ambas as fisionomias botânicas onde se verifica o predomínio espacial das espécies florestais. Corresponde ao trecho de confluência do vale do rio Araçuai com o amplo

vão do Jequitinhonha, penetrando ao longo do vale do rio Salinas. A área encontra-se sob o domínio do clima úmido a sub-úmido com precipitações entre 1.000 e 1.300 mm, concentradas nos meses de outubro a março;

- *Áreas de Contato Cerrado / Floresta Estacional*, este enclave distribui-se pelas chapadas e pequenos residuais de topo tabular que se dispersam por um grande setor da média bacia do rio Jequitinhonha, com preponderância de elementos do cerrado. O clima é sub-úmido a semiárido, com pluviometria total anual de 700 a 1.000 mm e chuvas concentradas no período de novembro a janeiro. Ocorre nas regiões das chapadas do Médio Jequitinhonha, e das Chapadas Residuais do Divisor entre bacia do rio Jequitinhonha com rio Pardo.
- *Áreas de Contato Cerrado / Refúgio Fitoecológico*, nas elevadas serras do Espinhaço, a vegetação de refúgio fitoecológico montano, caracterizada por espécies arbustivo-arbóreas típicas e campos rupestres, aparece entremeada de manchas de cerrado. A área, extremo ocidental da bacia, encontra-se submetida a climas úmido a sub-úmido, com precipitações de 900 a 1.300 mm, concentradas no período de outubro a março. Incluem-se as regiões da Serra do Espinhaço Central e Espinhaço Meridional.
- *Domínio Fitoecológico das Formações Pioneiras*, embora não ocorra necessariamente na porção mineira da bacia hidrográfica, considerada neste estudo, este domínio ocorre preponderantemente nos ambientes de deposição fluviais, marinhos e fluvio-marinhos na complexa área deltaica do Jequitinhonha, trata-se das vegetações características das planícies alagadas e restingas arenosas, bem como os manguezais que orlam os canais de águas salobras da foz.

Em levantamentos mais detalhados da fitofisionomia do Vale do Jequitinhonha, Amaral *et al.*, (2004), caracteriza a presença da Floresta Tropical Caducifólia no Alto e Médio Jequitinhonha, dando destaque às Formações Rupestres, ocorrentes em elevadas altitudes, possuindo fisionomia própria e comumente associadas a afloramentos rochosos, especialmente no contexto da Serra do Espinhaço. As condições ambientais extremas e a grande heterogeneidade espacial parecem ser responsáveis pela enorme diversidade beta que caracteriza essa formação vegetal, o número de espécies é grande, porém ainda mais notável é

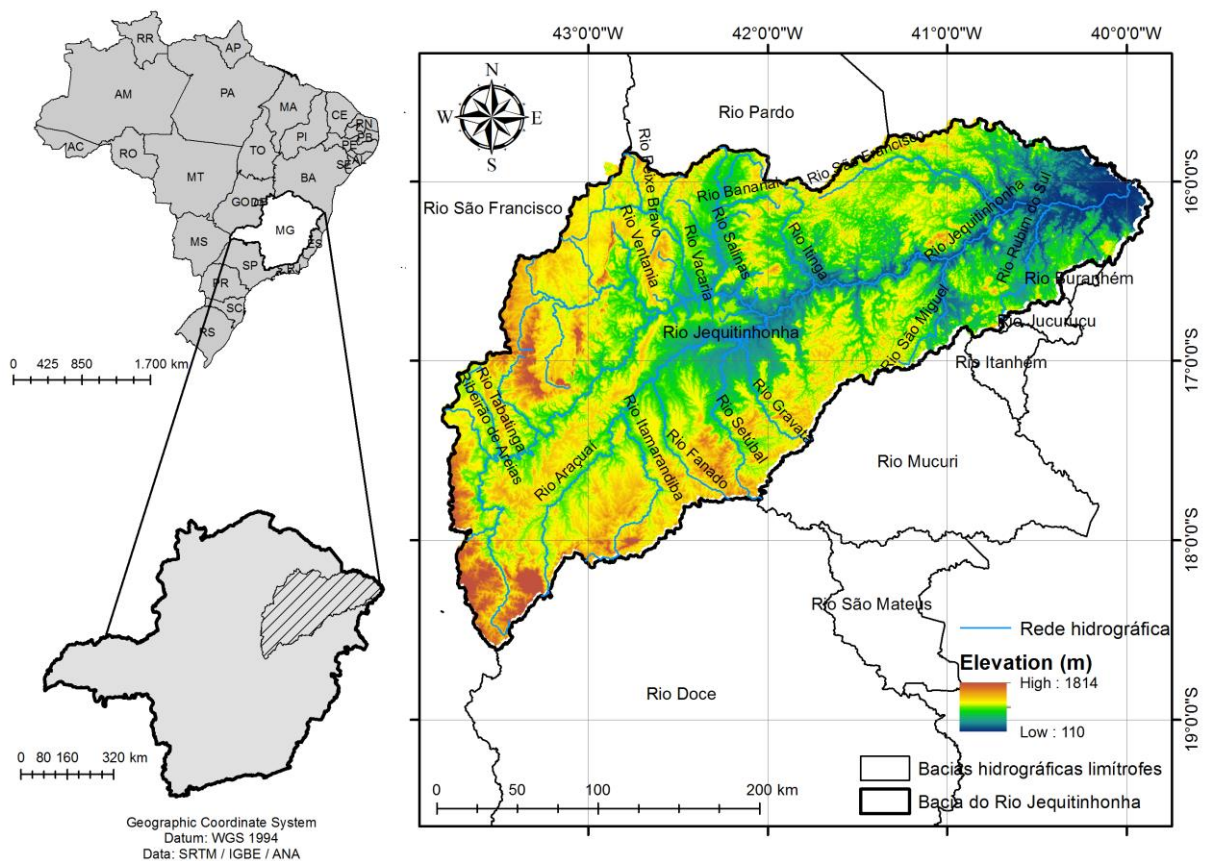
a alta concentração de espécies com distribuição restrita, uma grande parcela de sua biodiversidade por isso encontra-se vulnerável e necessita de proteção. Os campos rupestres abrigam um dos maiores patrimônios biológicos brasileiros e sua conservação depende do conhecimento amplo e detalhado de suas espécies e dos mecanismos envolvidos na dinâmica de suas populações (RAPINI *et al.*, 2008).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Caracterização da área de estudo

A área analisada corresponde a bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha, localizada na porção nordeste do estado de Minas Gerais, Brasil (Figura 2), com área total de 70.315 km<sup>2</sup>, dos quais 66.319 km<sup>2</sup> correspondem ao território mineiro e 3.996 km<sup>2</sup> ao estado da Bahia (IBGE, 1997). O mapa apresentado na Figura 2 refere-se à bacia hidrográfica no contexto do estado de Minas Gerais.

**Figura 2.** Localização da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha no contexto do estado de Minas Gerais, Brasil, sua organização hipsométrica com principais afluentes e bacias hidrográficas limítrofes.



## **4.2. Planos de Informações Geográficas**

Foram utilizados planos de informações geográficas para a determinação da fragilidade ambiental potencial, do que foi realizado a sobreposição destas informações para a geração do mapa final das áreas com as distintas classes de fragilidade do ambiente à degradação natural. Todas as etapas da presente metodologia em plataforma SIG, foram realizadas com auxílio do *software* ArcGIS 10.3.1 <sup>TM</sup> (ESRI, 2013).

Para esta etapa, fez-se a aquisição e organização de uma base de dados para os seguintes parâmetros considerados no estudo: Declividade do Terreno, Classes de Solos, Pluviosidade, Domínios Geológicos e Hierarquia Fluvial. Foram utilizadas informações de elevação do Modelo Digital de Elevação (MDE), obtidas a partir do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), disponibilizadas junto à Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuária – EMBRAPA (MIRANDA, 2005). Foram utilizados ainda dados de informações vetoriais referentes às classes de solos, adquiridas junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2016), além de informações geológicas do Serviço Geológico Brasileiro (CPRM, 2016). Para o plano de informação de pluviosidade, foi utilizada base de dados extraída do Atlas Pluviométrico do Brasil, gerado a partir dos dados de Estações Pluviométricas existentes na Bacia do rio Jequitinhonha, produzido no Programa de Levantamentos da Geodiversidade, do Serviço Geológico Brasileiro (CPRM, 2016), em Isoietas de Precipitações Médias Anuais entre 1977 e 2006.

### **4.2.1. Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente (MDHE)**

Para a geração do Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente (MDEHC), utilizou-se imagens *raster* da base SRTM do Modelo Digital de Elevação (MDE) (90m x 90m), do qual Miranda (2005) cita que a fonte primária para a geração destes modelos digitais de elevação da Embrapa, são dados originários da missão de mapeamento do relevo terrestre SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), desenvolvido pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e NGA (*National Geospatial-Intelligence Agency*), tratando-se de uma medida altimétrica precisa.

A realização do processamento dos dados SRTM foi dividido em quatro etapas, sendo elas: 1º - Mosaico (*Mosaic*); 2º - Extração de Máscara (*Extrac by Mask*), a partir do polígono da bacia hidrográfica, 3º - preenchimento de depressões espúrias (*fill sinks*); 4º - MDEHC (*Symbology*).

A primeira etapa do processamento foi a composição do MDE da bacia, onde adquiriu-se as cenas das imagens *raster* da base SRTM (Tabela 1), que englobassem a extensão da área de estudo, para posterior mosaicagem.

**Tabela 1.** Cenas SRTM para a bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha, Minas Gerais, Brasil.

Cenas SRTM	
SD-23-Z-D	SE-23-Z-A
SD-24-Y-C	SE-23-Z-B
SD-24-Y-D	SE-24-V-A
SE-23-X-A	SE-24-V-B
SE-23-X-B	SE-24-V-C
SE-23-X-C	SE-24-V-D
SE-23-X-D	SE-24-Y-A
SE-23-Z-D	---

Posteriormente utilizou-se o comando *Mosaic* para união das cenas das imagens. Após realização dessa etapa, a partir do *shapefile* do limite da bacia do rio Jequitinhonha, adquirido junto ao sítio eletrônico do Instituto Pristino (2016), foi realizado o corte dessa imagem *raster* com o comando *Extract by Mask*, dando prosseguimento a elaboração dos demais mapeamentos.

O Modelo Digital de Elevação gerado a partir de dados do SRTM geralmente apresenta falhas, conhecidas como depressões espúrias no relevo. As depressões são consideradas erros por padrão, pois são morfologias raras no relevo real, entretanto comuns no interpolador devido aos erros sistêmico do processo. Nos dados SRTM a presença de irregularidades é natural no relevo, sendo mais frequentes em áreas cuja inclinação da superfície seja maior que 20 graus, devido ao sombreamento ocasionado pelo radar (LUEDELING *et al.*, 2007).

Para correção dessas falhas utilizou-se o ferramentário *Fill Sinks (preencher)*, através do *ArcToolbox > Spatial Analyst > Hidrology > Fill Sinks*. Esta função permite correções no MDE, de modo que esta considera as altitudes dos pixels vizinhos para preencher os “*sinks*” (picos e depressões), suavizando a consistência no mapa do MDE (NOVAIS, 2015).

#### **4.2.2. Plano de Informação: Declividade do Terreno**

A declividade do terreno é expressa como a variação de altitude entre dois pontos do terreno, em relação à distância que os separa (TONELLO *et al.*, 2006), logo, a inclinação da feição superficial do terreno em relação ao plano horizontal, e pode ser medida em graus (de 0°

a 90°) ou em porcentagem, apresentando grande influência no favorecimento ou não da erosão de solos. Foi utilizada neste estudo a medida em porcentagem.

O mapa de declividade foi elaborado a partir do MDEHC, através do módulo *Spatial Analyst Tools > Surface > Slope*. Para se estabelecer os intervalos das classes de declividade foram utilizados os intervalos já consagrados nos estudos de Capacidade de Uso/Aptidão Agrícola associados aos valores já conhecidos de limites críticos de geotecnia (SPORL; ROSS, 2004), indicativos respectivamente do vigor dos processos erosivos, dos riscos de escorregamentos/deslizamentos e inundações frequentes (ROSS, 1994). Desta forma, as classes de declividade partiram de adaptação da classificação de Ross (1994) que divide os declives dos terrenos nas categorias apresentadas na Tabela 2.

**Tabela 2.** Classificação da declividade quanto sua fragilidade ambiental (ROSS, 1994).

<b>Classes de Declividade</b>	<b>Categoria Hierárquica da Fragilidade</b>
<b>Até 6 %</b>	Muito Fraca
<b>De 6 a 12 %</b>	Fraca
<b>De 12 a 20 %</b>	Média
<b>De 20 a 30 %</b>	Forte
<b>Maior que 30 %</b>	Muito Forte

Para a medida em porcentagem, considera-se que, quanto maior a base da superfície do terreno, menor é a declividade, de tal forma que, quanto menor essa base, maior será a declividade, logo, são grandezas inversamente proporcionais. A melhor compreensão do algoritmo utilizado para extrair a declividade da imagem matricial, considera a triangulação altura, base e declividade. Desta forma, os valores de declividade em aplicação prática, podem ser expressos pela seguinte expressão:

$$D = \left( \frac{h}{b} \right) * 100 \quad (\text{Equação 1})$$

**Onde:**

$D$  = Declividade do Terreno

$h$  = Altura entre dois pontos BC (Equidistância vertical)

$b$  = Distância horizontal entre dois pontos AC.

O cálculo da declividade em plataforma SIG é realizado com base nos valores altimétricos dos pixels adjacentes e, segue o princípio da equação de declividade encontradas

em Dunn e Hickey (1998). A informação de declividade aqui gerada, foi reclassificada no módulo *Reclass*, o que permitiu delimitar os intervalos de classes de declividade, conforme a classificação recomendada por Ross (1994).

#### **4.2.3. Plano de Informação: Hierarquia fluvial**

De tal forma que a declividade do terreno, a metodologia para geração da carta de hierarquia fluvial também é fundamentada no MDEHC. A realização do processamento dos dados SRTM para elaboração da hierarquia fluvial, ordenou-se a partir dos procedimentos para tratamento dos dados de MDE. Após a geração do mosaico, extração do polígono da bacia hidrográfica, e correção das depressões do relevo, gerou-se as informações de direção de fluxo (*flow direction*) e fluxo acumulado (*flow accumulation*), para, por conseguinte, delimitação da hierarquia fluvial (*Spatial Analyst Tools > Hydrology > Stream Order*) da drenagem, com base na direção de fluxo. Hengl *et al.* (2004) destacam a importância das correções das depressões do relevo para a eliminação de “*sinks*”, aplicado em modelos digitais de elevação para remoção de imperfeições nestes dados. Essas imperfeições devem ser corrigidas para gerar redes de fluxo e delimitar bacias de drenagem de forma mais fiel à verdade terrestre.

Christofoletti (1980) cita que a hierarquia fluvial consiste no processo de classificação de curso d'água (ou da área drenada que lhe pertence) no conjunto total da bacia hidrográfica na qual encontra-se. Isso é realizado com a função de facilitar e tornar mais objetivo os estudos morfométricos (análise linear, areal e hipsométrica) sobre as bacias hidrográficas. Quanto maior a participação percentual de canais de primeira ordem, maior é a fragilidade da paisagem, pois os mesmos indicam maior dissecação do relevo, que pode ser provocada por controle estrutural, como falhas, fraturas ou dobramentos.

Com as definições de hierarquia fluvial, adotou-se o método do sistema de classificação introduzido por Strahler (1952), o qual considera que os canais de primeira ordem são aqueles que não apresentam tributários, isto é, são canais de cabeceiras de drenagem. De acordo com o autor, a identificação inicia-se com os rios de 1ª ordem, que são aqueles que não recebem nenhum afluente. A partir da confluência de dois rios de 1ª ordem, forma-se um segmento de 2ª ordem. A confluência de dois rios de 2ª ordem define um rio de 3ª ordem e assim por diante. Quando dois rios de ordens diferentes juntam-se, prevalece a maior ordem.



#### **4.2.4. Plano de Informação: Classes de Solos**

O tipo de solo está diretamente relacionado à sua vulnerabilidade à erosão. As diferenças nos atributos físicos e químicos são determinantes para alguns solos erodirem mais que outros mesmo estando expostos a uma mesma condição ambiental (TERRA *et al.*, 2016).

Para o plano de informação das classes de solo foi utilizada a classificação do mapa de solos de Minas Gerais (FEAM, 2010). Para a determinação das classes dos solos referentes à bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha, foi realizada a extração do polígono da área em estudo e aplicada a nomenclatura com base na nova classificação de solos da EMBRAPA (2011).

Tomou-se também, como fundamento, a classificação recomendada por Ross (1994), que hierarquizou em cinco categorias o fator pedologia/solos, de acordo com critérios pré-estabelecidos, as classes de fragilidade foram baseadas nas características dos solos da área de estudo, tais como: textura, estrutura, plasticidade, grau de coesão das partículas e profundidade/espessura dos horizontes superficiais e subsuperficiais, tais características estão diretamente relacionadas com o relevo, litologia, e clima, elementos motores da pedogênese, e fatores determinantes das características físicas e químicas dos solos. Ross (1994), destaca que sua atribuição das classes de fragilidade para tipos de solos existentes, foram baseados em levantamentos de campo ao longo das expedições junto ao Projeto Radambrasil, somados com resultados de pesquisas desenvolvidas em de estudos clássicos em solos, tais como Lombardi Neto; Bertoni (1975) e Fasolo *et al.* (1982), entre inúmeros outros.

#### **4.2.5. Plano de Informação: Pluviosidade**

A pluviosidade pode ser relacionada a uma maior potencialidade de erosão do solo e assim, áreas com maiores declividades podem ser mais afetadas pelas chuvas por possuírem maior facilidade de ocorrência de processos erosivos.

Os níveis hierárquicos relativos a pluviosidade para a bacia do rio Jequitinhonha, foram definidos de acordo com a maior ou a menor intensidade do efeito pluviométrico sobre os processos morfodinâmicos, obedecendo-se a uma hierarquização de ordem crescente quanto à possibilidade de contribuição na interferência da estabilidade ecossistêmica.

Para a atribuição da fragilidade quanto aos índices de pluviosidade, utilizou-se como critério os níveis de interferência na estabilidade do ambiente a partir de adaptação das pressuposições de Ross (2012), em relação a distribuição e intensidade das chuvas, que têm ação direta sobre a dinâmica de superfície principalmente no que diz respeito ao intemperismo de rochas e solos.

A base de dados foi extraída do Atlas Pluviométrico do Brasil, gerado a partir dos dados das Estações Pluviométricas existentes na Bacia do rio Jequitinhonha, produzido pelo Serviço Geológico Brasileiro (CPRM, 2016), considerando uma série histórica do período entre 1977 a 2006 (período base), em Isoetas de Precipitações Médias Anuais. Foi necessário realizar a espacialização dos dados climáticos, onde primeiramente converteu-se as linhas de isoetas em pontos, por meio da ferramenta *Feature to Point (Data Management – Tool)*. Assim, por meio dos pontos de referência pluviométrica foi possível realizar-se a espacialização, através do método *Inverse Distance Weighted – IDW (Tool > Spatial Analyst > Interpolation > IDW)*.

O método do inverso da distância ponderada (IDW) estima um valor para um local não amostrado como uma média dos valores dos dados dentro de uma vizinhança (MELLO *et al.*, 2003). Segundo Righi e Basso (2016), o IDW é considerado o método mais simples de interpolação, que atribui peso maior ao ponto mais próximo, diminuindo esse peso com o aumento da distância e em função do coeficiente potência  $\alpha$ .

Para o cálculo da interpolação do valor de um ponto através do método do IDW, utiliza-se a seguinte equação matemática:

$$Z(x) = \sum_{i=1}^n \omega_i Z(x_i) / \sum_{i=1}^n \omega_i$$

(Equação 2)

Onde:

$Z(x)$  = é o valor do ponto que se deseja interpolar;

$n$  = é a quantidade de pontos próximos utilizados na interpolação do ponto  $x$ ;

$Z(x_i)$  = é o valor do ponto  $x_i$ ;

$\omega_i$  = é o peso do valor de  $x_i$  sobre o ponto  $x$ .

#### 4.2.6. Plano de Informação: Domínios Geológicos

Os domínios geológicos, uma vez que estão relacionados à litologia de um terreno, também são determinantes na potencialidade de erosão de uma determinada área, ou seja, quanto ao tipo de rocha de que é constituída, quais as suas características físicas (composição mineral, distribuição e tamanho dos grãos, cor, textura, estrutura e grau de compactação dos sedimentos ou rochas) (SILVA *et al.*, 2016).

O plano de informação dos domínios geológicos da bacia do rio Jequitinhonha, foram adquiridos junto ao Serviço Geológico Brasileiro (CPRM, 2016). As Unidades geológico-ambientais que apresentavam áreas com litótipos diferentes, receberam dentro a escala de pesos de fragilidade, distintas atribuições de valores, feitos de modo a considerar-se o grau de coesão

das rochas, sua susceptibilidade ao intemperismo físico e químicos, de acordo com a carta de vulnerabilidade natural à perda de solo do estado do Maranhão (QUARTAROLI *et al.*, 2013), e com base nos valores de vulnerabilidades recomendados por Crepani *et al.*, (2001), o qual destaca, que o acesso do agente intemperizador (água) e a remoção do produto intemperizado, são aspectos importantes a serem considerados em relação ao intemperismo das rochas, pois quanto mais o agente intemperizador fica em contato com o mineral, mais ele será intemperizado. Desta forma, quanto mais porosa é a rocha, ou mais fraturada, mais a água pode atacar seus grãos constituintes e mais rapidamente também são retirados os produtos do intemperismo para que novas superfícies do cristal sejam expostas e intemperizadas.

#### 4.3. *Processamento dos Dados*

Para a determinação da fragilidade ambiental potencial, executou-se uma adaptação a referida proposta metodológica de Ross (1994), onde foram utilizados além dos critérios comumente mais utilizados na literatura, novos elementos da paisagem. Foram consideradas Declividade do Terreno, Classes de Solos, Pluviosidade, Domínios Geológicos e Hierarquia Fluvial, sendo os dois últimos, embora parâmetros importantes, contudo ainda pouco ou não considerados noutros estudos.

Para cada um dos parâmetros foram estabelecidas classes de fragilidades, conforme o estudo individual de suas características, foram atribuídos pesos de 1 a 5 por variável, representando nomeadamente as categorias: 1 (*Baixa*), 2 (*Levemente Baixa*), 3 (*Média*), 4 (*Alta*) e 5 (*Extremamente Alta*), tal como enquadrados na caracterização e descrição apresentados na Tabela 3. Assim como o mapa final de FAP também apresenta tal categorização após a sobreposição de todos os parâmetros analisados.

**Tabela 3.** Classes de fragilidade e seus respectivos pesos e descrições. (\*Adaptado de Scolforo *et al.*, 2008).

CLASSES	PESO	*DESCRIÇÃO
<b>Baixa</b>	<b>1</b>	O mais baixo nível de fragilidade ambiental, nesta classe, as áreas quase sempre não apresentam restrições significativas quanto a utilização dos recursos naturais, pelo fato de encontrarem-se com elevado potencial de resiliência, ou seja, em equilíbrio dinâmico. A combinação de fatores condicionantes determina esse nível de susceptibilidade natural, demandando preocupações menos severas para intervenções antropogênicas. As estratégias de desenvolvimento dessas áreas podem apontar para ações que causem impactos ambientais menos rigorosos do ponto de vista ambiental. Esta classe apresenta maior resistência à perturbações e à susceptibilidade quanto à degradação ambiental.

<b>Levemente Baixa</b>	<b>2</b>	Esta classe também representa um nível de baixa fragilidade com condições físico-naturais de estabilidade do ambiente. Contudo, apresenta pelo menos uma característica que não a inclui na classe anterior. Neste, as áreas apresentam baixas restrições quanto a utilização dos recursos naturais, alguns fatores condicionantes determinam um leve nível de susceptibilidade, porém a maioria dos fatores apresenta baixa susceptibilidade natural. As estratégias de desenvolvimento dessas áreas devem apontar para ações que ofereçam baixo impacto potencial aos fatores limitantes. Esta classe apresenta ligeira resistência à perturbações e à susceptibilidade quanto à degradação ambiental.
<b>Média</b>	<b>3</b>	A média fragilidade trata de ambientes com fatores de fragilidade em transição das classes baixas para as classes altas, uma classe de alerta para os riscos ambientais sobre os quais o território está sujeito. Nesta classe de fragilidade, as áreas apresentam restrições moderadas quanto a utilização dos recursos naturais. Algum fator condicionante determina esse nível de susceptibilidade, porém, os demais apresentam relativa fragilidade. As estratégias de desenvolvimento dessas áreas devem apontar para ações que não ofereçam danos potenciais ao fator limitante, pois trata-se de áreas que já merecem relativa atenção em termos de proteção, conservação e manejo adequado do solo e dos recursos naturais. Um fator ambiental impactante a mais, tal como no uso e ocupação da terra, pode transferir áreas de média fragilidade para as classes de alta fragilidade. Esta classe apresenta moderada resistência à perturbações e à susceptibilidade quanto à degradação ambiental.
<b>Alta</b>	<b>4</b>	Nesta classe de fragilidade, as áreas apresentam restrições já demonstradas e consideráveis quanto a utilização dos recursos naturais, pelo fato de que se encontram essencialmente muito mais susceptível às ações antrópicas do que na classe anterior. Uma combinação de fatores condicionantes determina esse nível de susceptibilidade natural, demandando avaliações cuidadosas para implementação de qualquer empreendimento ou intervenção antrópica. As estratégias de desenvolvimento dessas áreas devem apontar para ações que causem o menor impacto possível, ou essencialmente destina-las a conservação ou proteção ambiental. Esta classe apresenta alta sensibilidade à perturbações e à susceptibilidade quanto à degradação ambiental.
<b>Extremamente Alta</b>	<b>5</b>	Áreas com extrema sensibilidade ambiental, apresentam sérias restrições quanto a utilização dos recursos naturais, pelo fato de que encontram-se altamente vulneráveis aos impactos das ações antrópicas. São territórios inaptos para atividades antrópicas, devido as mais frágeis combinações de características físicas naturais a degradação dos solos. Áreas potencialmente muito sujeitas a erosões e voçorocamentos. Uma combinação de fatores condicionantes determina esse nível de susceptibilidade natural, demandando avaliações demasiadamente cuidadosas para qualquer tipo de intervenção antrópica. As estratégias de intervenções dessas áreas devem apontar para ações que não causem impactos ambientais. Áreas de relevante interesse à conservação da biodiversidade e recursos naturais. Apresenta extrema sensibilidade à perturbações e susceptibilidade quanto à degradação ambiental.

A metodologia aplicada para esse estudo está apoiada nos conceitos da análise da fragilidade ambiental com base na classe de declividade, propostos por Ross (1994), o qual encontra explicação em dois termos distintos, a fragilidade potencial e a fragilidade emergente, entretanto, neste estudo foi realizado somente o mapeamento da fragilidade potencial, baseado apenas na análise dos elementos físico-naturais. A fragilidade potencial representa fatores intrínsecos à paisagem, enquanto a fragilidade emergente considera ainda a cobertura da terra e intervenções antrópicas (VALLE *et al.*, 2015). O estudo destas variáveis possibilita a definição das classes de fragilidades naturalmente potenciais à erosões e movimentação dos

solos, que, se sujeitos a ações antropogênicas, apresentar-se-ão em condições de instabilidade ambiental, demasiadamente aptas a degradações.

#### **4.3.1. Método *Analytic Hierarchy Process* (AHP)**

Proposta por Saaty (1980), o método AHP parte da lógica da comparação pareada, isto é, os diferentes fatores que contribuem para uma finalidade superior são comparados dois a dois, e um critério de importância relativa, preferência ou probabilidade é atribuído ao relacionamento entre estes fatores, em conformidade com uma escala pré-definida (CÂMARA *et al.*, 1996).

A metodologia foi aplicada utilizando os 5 (cinco) fatores físico-naturais, enquadrados no método *Analytic Hierarchy Process* (AHP), de tal forma que este processo de análise hierárquica pudesse permitir a integração com a plataforma SIG na geração de um mapa final de fragilidade ambiental o mais próximo possível da realidade do terreno.

A Avaliação Multicritério ou de Múltiplos Critérios (AMC) é uma importante ferramenta para orientar em tomadas de decisão. Para efetuar esta análise são utilizados vários critérios simultâneos que podem ser representados na forma de camadas de dados geográficos, sendo, neste caso, a utilização de ferramentas de SIG essencial (FUSHITA *et al.*, 2010). Desta forma, nos estudos de AMC, vem destacando-se o método AHP, utilizado neste estudo com o objetivo de aprimorar a avaliação da fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha, de modo a gerar uma carta principal com cenário de susceptibilidade para a região hidrográfica.

O Método AHP de auxílio multicritério à tomada de decisão, segundo Saaty (1980), é uma técnica de análise de decisão e planejamento de múltiplos critérios, na qual sua aplicação reduz o estudo de sistemas complexos, a uma sequência de comparações aos pares de componentes adequadamente identificados. A técnica tem sido amplamente aplicada na atribuição dos pesos para a tomada de decisão. Contudo, de acordo com Saaty (2008), para tomar a melhor decisão possível, e de forma organizada, por meio do método do AHP, é necessário seguir as seguintes condições: i - Definir o problema e objetivo que se pretende alcançar; ii - Estruturar os critérios em forma de hierarquia; iii - Construir uma matriz quadrada de comparação de pares, em que os critérios são comparados par a par; iv - Por último é atribuído um peso, a cada um dos critérios, de modo a obter o grau de importância de cada um.

Para a aplicação do método de decisão multicritério, realizou-se em plataforma SIG, a concatenação de todos os mapas de fatores gerados. A ferramenta de álgebra de mapas permitiu

a execução da operação. Logo, foi realizada a análise de confronto entre os fatores, com a finalidade de gerar os pesos de importância. Este método é aplicável a situações que envolvem julgamentos subjetivos e utiliza-se tanto dados quantitativos como qualitativos. Assim, elaborou-se a matriz matemática de análise par a par, resultando nos pesos atribuídos a cada camada. Desta forma, procedeu-se a soma ponderada de todas as camadas, com base nos resultados da matriz que apresentou os fatores por grau de importância. A resolução da matriz tomou como base uma escala de comparação de critérios desenvolvida por Saaty (1980), conforme apresentado na Tabela 4.

O processo analítico hierárquico (AHP) deve respeitar três pressupostos: *Reciprocidade* (Se  $a_{ij} = x$ , então  $a_{ji} = 1/x$ , com  $1/9 \leq x \leq 9$ ); *Homogeneidade* (Se os elementos  $i$  e  $j$  são considerados igualmente importantes, então,  $a_{ij} = a_{ji} = 1$ , além disso  $a_i = 1$  para todo  $i$ ); e *Consistência* (Índice de Consistência – IC e Razão de Consistência – RC).

**Tabela 4.** Escala fundamental referente à importância relativa a partir da comparação de critérios, adaptada de Saaty (1980).

Escala	Avaliação	Recíproco	Descrição
<b>Mesma Importância</b>	1	1	Os dois critérios contribuem igualmente para o objetivo
<b>Importância Moderada de um sobre o outro</b>	3	1/3	A análise, experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação a outra, ou seja, que um critério é um pouco mais, ou ligeiramente mais importante que o outro.
<b>Importância essencial ou forte</b>	5	1/5	É evidente que um dos critérios é claramente predominante e mais importante que o outro.
<b>Importância muito forte ou demonstrada</b>	7	1/7	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação a outra; sua dominação de importância pode ser demonstrada na prática.
<b>Extremamente mais Importante</b>	9	1/9	Sem qualquer dúvidas um dos critérios é absolutamente predominante sobre o outro; a evidência favorece uma atividade em relação a outra com o mais alto grau de certeza.

O julgamento reflete as respostas de duas perguntas: “Qual dos dois elementos é mais importante com respeito a um critério de nível superior?” e “Com que intensidade, utilizando a escala que varia de 1 a 9?” (SILVA, 2007). Nisto, a aplicação do método requer o julgamento e avaliação técnica de distintos especialistas em diferentes áreas do conhecimento associadas à

temática da pesquisa, que emitem suas ponderações à matriz AHP, de acordo com seus conhecimentos técnico-científico e experiências. Ao final faz-se a ponderação e balizamento do consenso entre as análises. A tabela da escala fundamental de Saaty (1980) apresenta ainda, quando necessário, a possibilidade do uso de valores intermediários (2, 4, 6 e 8) a serem utilizados quando não há consenso entre algum item de julgamento, logo, procura-se condições de compromisso entre duas definições, fazendo-se necessário acordo.

A etapa seguinte à atribuição numérica da análise pareada, realizam-se as operações matemáticas das matrizes, configurando-se em 5 sub-etapas (SAATY, 1991), sendo elas:

- (1) **Cálculo do autovetor principal**, em que primeiramente calcula-se o somatório dos pesos da avaliação. Após esta etapa, normaliza-se a matriz de comparação, onde divide-se os valores de cada comparação (célula) pelo somatório da coluna a que pertence. Por fim, apresenta o autovetor, que é a somatória dos elementos da linha da matriz de comparação normalizada dividida pelo somatório dos elementos da matriz de comparação;
- (2) **Cálculo do autovalor máximo**: calculado pela somatória do produto entre a matriz dos pesos pelo autovetor;
- (3) **Cálculo do Índice de Consistência (IC)**: o IC é calculado a partir do autovalor, onde o  $\lambda_{\text{Max}}$  é o auto valor e  $n$  é o número de critérios comparados;
- (4) **Cálculo do Grau ou Razão de Consistência (Consistency Ratio – CR)**: O CR indica o nível de coerência do julgamento do avaliador. Seu cálculo se dá pela Equação 4. A verificação da consistência dos dados, visa captar se os operadores foram consistentes nas suas opiniões para a tomada de decisão;
- (5) **Análise dos dados**: O limite aceitável para a Razão de Consistência é de  $CR \leq 0,10$ , contudo, observa-se que a incoerência nas comparações deve servir como um alerta, sendo necessária a revisão para  $CR > 0,10$ .

#### **4.3.2. Razão de Consistência AHP**

Fundamentado numa metodologia científica, o método permite analisar, determinar e decidir os diversos critérios que influem na tomada de decisão e, consequentemente gerar informações que auxiliem o decisor a escolher a melhor das alternativas propostas, com base nos critérios analisados. Mais do que determinar a decisão correta, o método permite justificar a escolha de forma consistente e coerente (SANTOS; CRUZ, 2013). Este método calcula um

conjunto de pesos e uma relação de consistência, permitindo ajustes repetidos na comparação (MARTINS *et al.*, 2014).

Contudo, por conseguinte, é necessário verificar a inconsistência envolvida nos dados. A verificação visa constatar se os decisores foram consistentes nas suas opiniões para a tomada de decisão. Assim, o cálculo do índice de consistência (SAATY, 2005) é dado pela seguinte equação:

$$I. C = \frac{\lambda_{Max} - n}{n - 1} \quad (\text{Equação 3})$$

**Onde:**

**IC** = Índice de Consistência;

**n** = Número de critérios avaliados;

**$\lambda_{Max}$**  = Número principal de Eigen.

O autovetor ou vetor principal de Eigen ( $\lambda_{Max}$ ) é obtido calculando-se o somatório do produto de cada elemento da matriz de comparação pelo vetor de prioridade (Eigen) de cada critério, dividindo-se o resultado dessa expressão pelo vetor de prioridade do qual calcula-se a média aritmética (SANTOS; CRUZ, 2013).

Desta forma, é necessário verificar se o valor encontrado do Índice de Consistência (IC) é adequado, Saaty (2005) propôs então uma Relação ou Razão de Consistência (RC), que é determinada pela razão entre o valor do Índice de Consistência (IC) e o índice de consistência aleatória ou Índice Randômico (IR), que varia com o tamanho *n* da amostra. A matriz será considerada consistente se a razão for  $\leq 0,10$  ou 10%. A relação é demonstrada pela seguinte expressão:

$$R. C = \frac{IC}{IR} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde IR é um valor constante e depende da dimensão da matriz que se está comparando, ou seja, do número de critérios avaliados, conforme a Tabela 5.

**Tabela 5.** Valores de IR (Índice Randômico) para matrizes quadradas de diferentes tamanhos (n) (SAATY, 2005).

Dimensão da matriz (n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Valor de IR	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49



O grau de consistência é satisfatório, segundo Saaty (2005), quando os valores de RC forem inferiores ou iguais a 0,10. Quando encontrados valores de RC superiores a 0,10 (10%), o autor recomenda reavaliar novamente os dados levantados junto aos especialistas, verificando-se se não houve equívocos ou erros durante o processo de levantamento.

Os procedimentos de aplicação do Método AHP, Índice e Razão de Consistência foram realizados no *software* de dados Excel®.

#### 4.3.3. *Elaboração do mapa final de Fragilidade Ambiental Potencial (FAP)*

Para a elaboração do mapa síntese de fragilidade potencial foram aplicados os métodos de combinação de mapas (álgebra de campo), por meio de sobreposição ponderada no *software* ArcGIS 10.3. Inicialmente fez-se a conversão dos dados vetoriais para a estrutura matricial (formato Grid.) e posteriormente a reclassificação, por meio da ferramenta *Spatial Analyst Tools/Reclassify*. Em seguida, as etapas percorridas foram as seguintes: *Spatial Analyst Tools/Map Algebra/Raster Calculator*. A álgebra de mapas é o procedimento de combinação de variáveis que apoia a análise de multicritérios, ou seja, são operações matemáticas utilizando-se mapas, dados rasters, conforme variáveis consideradas, que produzem novos resultados para análise e síntese da informação (DEODORO; FONSECA, 2016).

A partir do processamento dos Planos de Informação (PI) referentes a cada parâmetro avaliado e seus pesos de importância atribuídos de acordo com a matriz desenvolvida, executou-se a álgebra de mapas, através da Análise Multicriterial em ambiente SIG.

Para geração do mapa final de FAP, aplicou-se a seguinte equação para cálculo de soma algébrica ( $\sum F_i$ ) dos PI:

$$FAP = \sum (F_n * X_n) \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

**FAP** = Fragilidade Ambiental Potencial;

**F<sub>n</sub>** = Fragilidade dos *n* parâmetros;

**X<sub>n</sub>** = Pesos estatísticos dos *n* parâmetros.

A sobreposição das informações algébricas no *software* de SIG consistiu no somatório dos produtos estabelecidos para análise neste estudo, conforme a expressão abaixo:

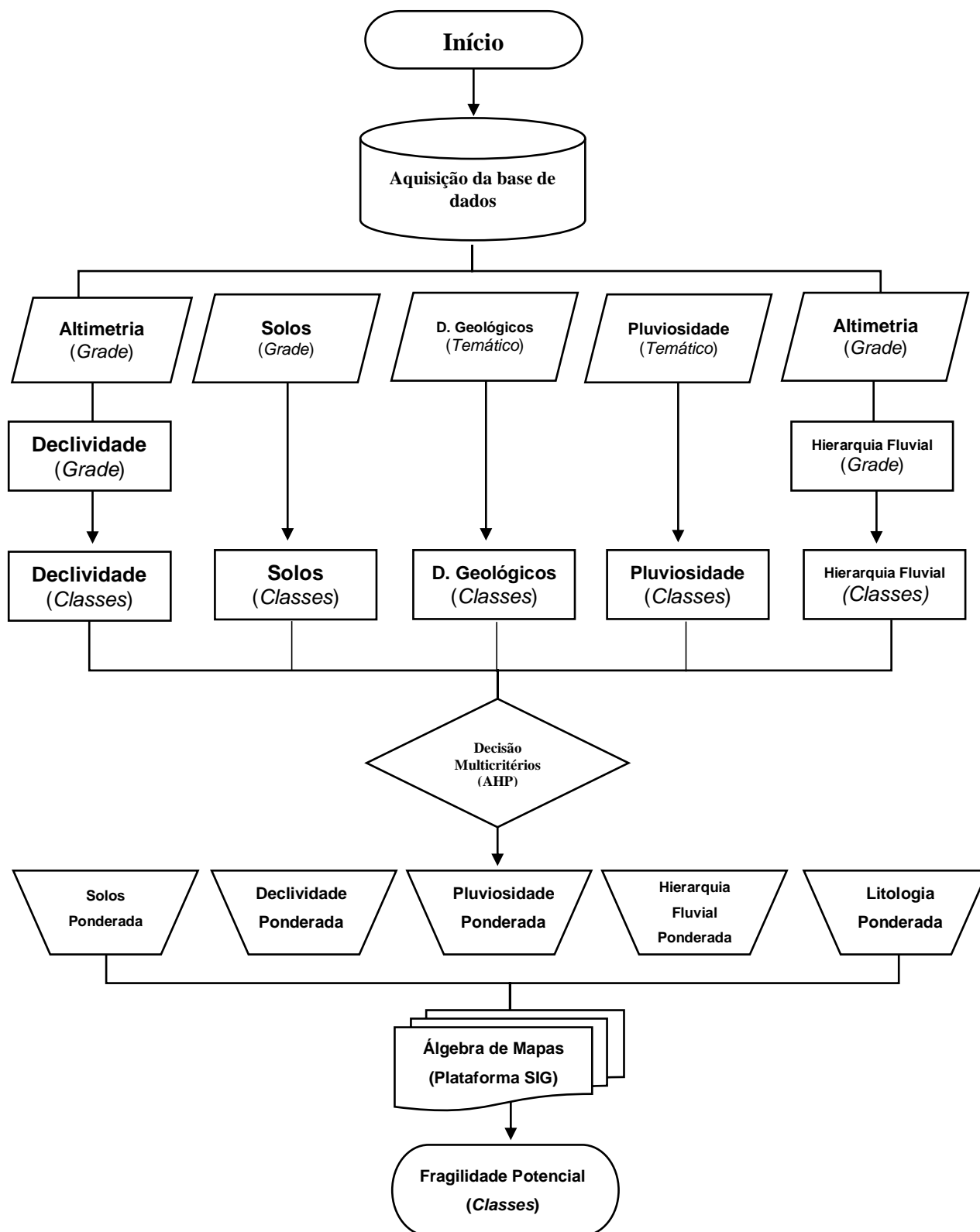
$$FAP = (F_D * x_1) + (F_{CS} * x_2) + (F_{DG} * x_3) + (F_{HF} * x_4) + (F_P * x_5) \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

**FAP** = Fragilidade Ambiental Potencial;  
**F<sub>D</sub>** = Fragilidade quanto à Declividade do Terreno;  
**F<sub>S</sub>** = Fragilidade quanto à Classes de Solos;  
**F<sub>DG</sub>** = Fragilidade quanto à Domínio Geológico;  
**F<sub>HF</sub>** = Fragilidade quanto à Hierarquia Fluvial;  
**F<sub>P</sub>** = Fragilidade quanto à Pluviosidade;  
**X<sub>1...5</sub>** = Pesos de importância de cada parâmetro.

A etapas de processamento dos PI analisados, são apresentadas no fluxograma da Figura 3.

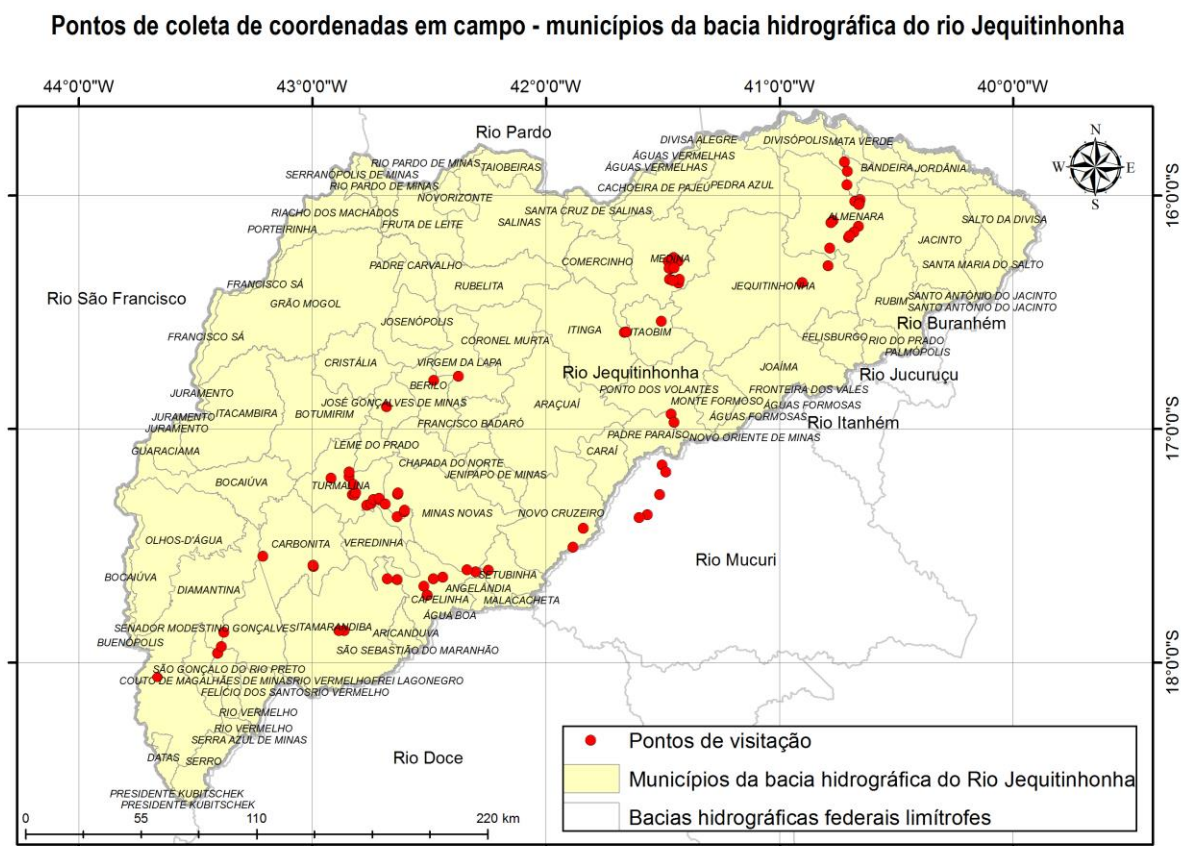
**Figura 3.** Fluxograma das etapas de processamento metodológico para geração do mapa de fragilidade ambiental em ambiente SIG.



#### 4.3.4. Diagnósticos in situ

Considerando-se as extensas dimensões da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha, foram realizadas visitas técnicas, de modo a perceber-se as distintas características fisiográficas da região. Foram considerados pontos de localização em sítios do baixo, médio e alto Jequitinhonha, com saídas realizadas em novembro de 2016, setembro e novembro de 2017, além de pontos nas localizações em Diamantina, Couto de Magalhães de Minas, Itamarandiba, Carbonita, Capelinha, Setubinha, Turmalina, Minas Novas, José Gonçalves de Minas, Berilo, Virgem da Lapa, Itinga, Itaobim, Medina, Jequitinhonha, Almenara, Bandeira, Padre Paraíso e Novo Cruzeiro (Figura 4).

**Figura 4.** Pontos de localização dos sítios verificados em campo na bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha, Minas Gerais, Brasil.



As vistorias realizadas a campo constituíram-se na necessidade de perceber as diferentes classes fisiográficas da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha, e como podem influenciar numa condição de maior ou menor fragilidade ambiental. Em cada sítio averiguado foram coletadas coordenadas geográficas por meio de *Global Positioning System* (GPS), adicionalmente, com anotações em caderneta de campo sobre a descrição do ambiente correspondente aos pontos amostrados, bem como a referência de fotografias registradas nos

locais. A descrição do ambiente incluiu o maior número de informações possíveis, considerando-se a dinâmica do uso e cobertura da terra, interações entre os padrões espaciais, processos ecológicos, vegetação, recursos hídricos, agricultura, pecuária, mineração, dentre outros fatores característicos das zonas visitadas no contexto da bacia hidrográfica em questão.

Para esta etapa uniu-se de equipamento fotográfico digital, cadernetas de campo, cartas topográficas, mapas de cobertura vegetal, mapas com imagem de satélite, e aparelho de GPS.

## 5. RESULTADOS

Foram gerados os mapas individuais dos fatores da análise multicritério, com suas devidas classes, áreas quantificadas e demais informações pertinentes a compreensão das características que condicionam à fragilidade ambiental, conforme apresentado nos sub-tópicos abaixo.

### 5.1. Mapa de Declividade do Terreno

Quanto a declividade do terreno na bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha, a área apresenta predominância dos relevos de planos a escarpados, constatando-se uma grande percentagem dos relevos de (declive: 0 – 6 %), com 22% da área total, (declive: 6 – 12 %), com 24,2% da área e de (20 – 30%) representando 18,3% do território da bacia hidrográfica. A classe de declividade de 12 a 20% representa a maior área em extensão, com 25,4%, e as áreas com declividades acima de 30%, até 222%, representam 9,2% da bacia hidrográfica. Os dados de áreas por declividade são apresentados na Tabela 6, assim como suas relações com as classes de fragilidade ambiental.

**Tabela 6.** Classes de fragilidade atribuídas a declividade do terreno da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha (MG).

Declividade		Área		Fragilidade	
Porcentagem*	Graus	(km <sup>2</sup> )	(%)	Classe Hierárquica	Peso atribuído
0 – 6 %	3°	14.890,00	22,8	<i>Baixa</i>	1
6 – 12 %	7°	15.825,81	24,2	<i>Levemente Baixa</i>	2
12 – 20 %	11°	16.606,84	25,4	<i>Média</i>	3
20 – 30 %	17°	11.942,80	18,3	<i>Alta</i>	4
> 30 %	> 17°	6.015,42	9,2	<i>Extremamente Alta</i>	5
Total (Σ)		65.281	100	---	---

\*Neste estudo, a categoria de declividade considerada no mapeamento da fragilidade ambiental foi em porcentagem (%), conforme recomendação de Ross (1994).

De acordo com Ross (1994) os valores de declividade indicam as características do relevo que geram energia potencial para a ocorrência de processos geomorfológicos, como erosão laminar e deslizamentos. Neste sentido, classes de fragilidades e seu respectivo valor variam de acordo com o percentual de declividade, dessa forma, as declividades menores correspondem às classes de fragilidade mais baixas, e as de declives mais acentuados, às de fragilidade mais alta. É apresentado ainda na Figura 5 o mapa de declividade da bacia hidrográfica, e na Tabela 7 as descrições referentes às classes de declividade de terrenos, assim como o comportamento dos processos erosivos, e potenciais atividades impactantes.

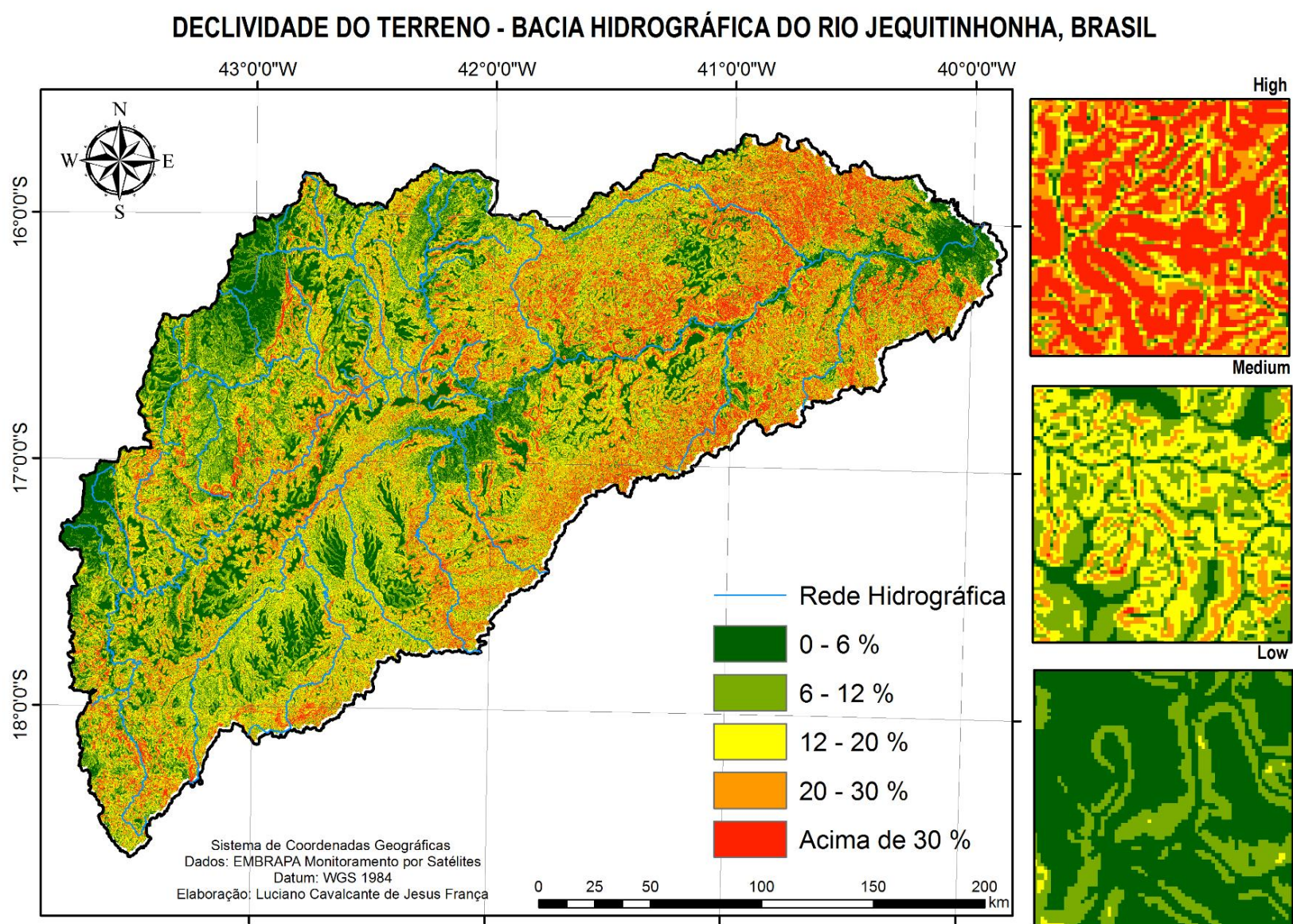
**Tabela 7.** Relação entre classes de declividade, morfologia, processo de erosão e atividades impactantes – Adaptado de Embrapa (1979) e Granell-Pérez (2004).

Classificação do relevo (Embrapa, 1979)	Relevo para Fragilidade Ambiental (Ross, 1994)	Descrição Morfológica	Processo de Erosão	Atividades econômicas mais comuns/recomendadas
Plano (0 – 3%)	0 – 6 %	Terreno com superfície de topografia horizontal, onde os desnivelamentos são quase inexistentes. Planície aluvial (várzea), terraço fluvial, superfície de erosão.	Sem perdas de solos ou escorregamentos	Agricultura mecanizada, urbanização, infraestruturas viárias.
Suave-Ondulado (3 – 8%)		Terrenos pouco movimentados constituídos por conjunto de colinas e/ou outeiros (elevações de altitudes relativas da ordem de 50 a 10 m, respectivamente) com declive suave. Ondulações suaves, fundos de vale, superfícies tabulares.	Início de solifluxão, escoamento difuso e laminar. Sulcos.	Agricultura convencional; Também indicada para urbanização e mecanização agrícola e florestal.
Ondulado (8 – 20%)	6 – 12% 12 – 20%	Terrenos pouco movimentados constituídos por conjunto de colinas ou outeiros com declives moderado, e mais acentuado que a classe anterior. Início de encostas de morros, relevos estruturais monoclinais do tipo cuesta.	Movimentos de massas, escoamento laminar, <i>creep</i> , escorregamentos. Sulcos, ravinas.	Reflorestamento e agricultura com conservação moderada a intensiva. Mecanização já dificultada. Pouco apto para urbanizações e infra-estruturas.
Forte-Ondulado (20 – 45%)	20 – 30%	Terrenos movimentados constituído por conjunto de outeiros e/ou morros (elevações de 100 a 200 m de altitude relativa) e raramente colinas, com declives fortes.	Erosão linear forte, destruição de solos, escorregamentos, movimentação de blocos.	Reflorestamentos comerciais e em algumas condições, pecuária. Não

				apto para urbanização e infra-estrutura.
Forte-Montanhoso (45 – 75%)	Acima de 30% até 222%	Terrenos muito movimentados com superfícies de topografias vigorosas, com predomínio de formas acidentadas, usualmente constituídos por morros, montanhas, maciços montanhosos e alinhamentos montanhosos apresentando desnivelamentos relativamete grandes e declives fortes ou muito fortes,	Erosão Linear muito forte, escorregamentos, queda de blocos, avalanches.	Preferencialmente destinável à conservação ambiental ou atividades de baixo impacto ambiental.
Escarpado (Acima de 75%)		Terrenos com predomínio de formas abruptas compreendendo superfícies muito íngremes, tais como escarpamentos do tipo: aparados, itaimbés, frente de cuestras, falésias, vertentes de declive muito fortes de vales, etc. Paredões e escarpas.	Quedas em massa, escorregamentos, colapsos.	Inapto para qualquer atividade agrícola-florestal comercial. Recomendado para priorização da conservação vegetal.



**Figura 5.** Mapa de declividade do terreno da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha, MG, Brasil.



## 5.2. Mapa de Classes de Solos

A bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha apresenta tipologias de solos do 1º e 2º nível de ordens do Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (SiBCS), sendo eles distribuídos entre Latossolos Vermelho (6.523,65 km²), Latossolos Amarelo (2.263,73 km²), Latossolos Vermelho-Amarelo (10.632,52 km²), Argissolos Vermelho-Amarelo (13.253,57 km²), Planossolos (19,48 km²), Cambissolos Háptico (6.120,6 km²), Argissolos Vermelhos (15.238,04 km²), Neossolos Litólicos (9.035,32 km²), além das coberturas de afloramentos de rochas (1.909,62 km²) (Tabela 8). Os solos considerados neste estudo englobam os níveis de Ordem a Subordem e sua distribuição espacial é apresentada na Figura 6.

**Tabela 8.** Áreas em km² e percentagens referente às classes de solos da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha, MG.

Classe	Área	
	Km²	%
<i>Afloramentos de Rocha</i>	1.909,6	2,93
<i>Cambissolo Háptico</i>	6.120,6	9,42
<i>Latossolo Amarelo</i>	2.263,7	3,48
<i>Latossolo Vermelho-Amarelo</i>	10.632,5	16,36
<i>Latossolo Vermelho</i>	6.523,6	10,04
<i>Planossolos</i>	19,5	0,03
<i>Argissolo Vermelho-Amarelo</i>	13.253,6	20,39
<i>Argissolo Vermelho</i>	15.238,0	23,44
<i>Neossolos Litólicos</i>	9.035,3	13,90
<b>Total (Σ)</b>	64.996,5	100

As classes de solos com os pesos de fragilidade ambiental atribuídos, são apresentados na Tabela 9.

**Tabela 9.** A tipologia dos solos quanto suas fragilidades (Adaptado de Ross, 1994).

Classe de Solo	Fragilidade Ambiental	
	Classe hierárquica	Peso atribuído
Latossolo Vermelho; Latossolo Amarelo; Latossolos Vermelho-Amarelo ( <i>textura média/argilosa</i> ); Planossolos.	Baixa	1
Argissolo Vermelho-Amarelo ( <i>textura média/argilosa</i> );	Média	3
Cambissolos Háplicos	Alta	4
Argissolo Vermelho; Neossolo Litólicos; Afloramento de Rocha.	Extremamente Alta	5

\* A classe referente às *águas internas* correspondeu ao peso 0 (zero).

No Quadro 1, apresenta-se uma caracterização geral dos solos presentes na bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha, e associação com o tipo de relevo existente, adaptado do Mapeamento de Solos e Aptidão Agrícola das Terras do Estado de Minas Gerais, da EMBRAPA (AMARAL *et al.*, 2004).

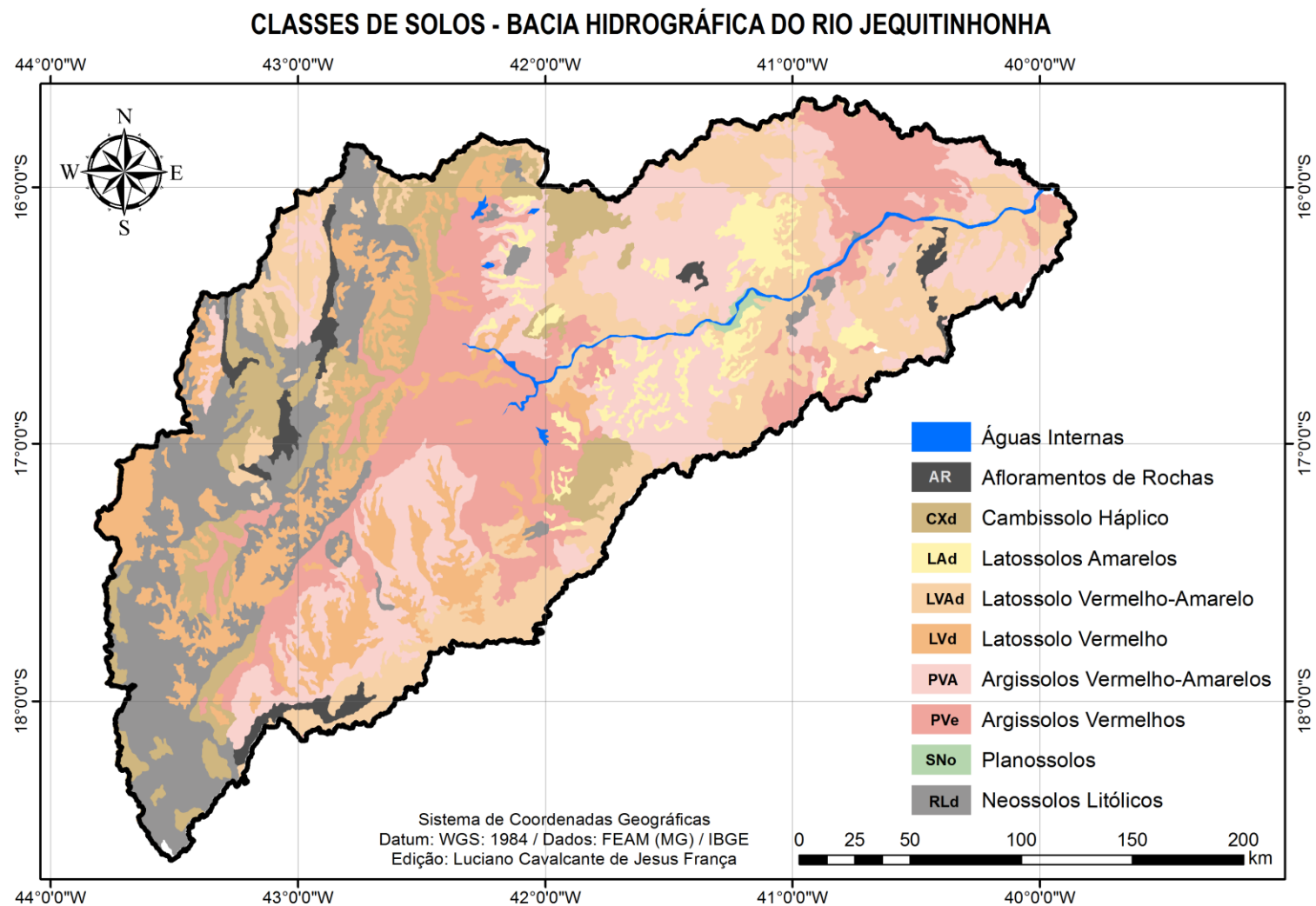
**Quadro 1.** Caracterização geral dos solos presentes na bacia do rio Jequitinhonha e associação com o tipo de relevo existente, de acordo com Amaral *et al.*, (2004).

Classe de solos	Características Gerais	Tipo de relevo associado
<i>Latossolos Amarelo</i>	Diferenciam-se dos outros Latossolos, por serem mais coesos e apresentarem, via de regra, argila dispersa no B1 e menos frequentemente no B21, e por apresentarem nos horizontes A3, B1 e B21 estrutura geralmente em blocos fracamente desenvolvida; consistência quando seco muito dura ou ligeiramente dura e, quando úmido, friável ou firme; e densidade do solo relativamente alta (1,3 a 1,6 g.cm <sup>3</sup> ) com porosidade total relativamente baixa e virtualmente sem cerosidade. No Estado de Minas Gerais, predominam os solos álicos, com horizonte A moderado, textura argilosa. São bem acentuadamente drenados e ocorrem normalmente associados aos Podzólicos Amarelos. Possuem ainda elevada acidez ativa e grande propensão à compactação (a maior entre os Latossolos)	Relevos plano e suave ondulado

<i>Latossolos Vermelho-Amarelo</i>	São solos profundos e normalmente bem drenados. Esta classe é a que melhor representa as características gerais dos Latossolos. Ocorrem em ordem decrescente solos álicos, distróficos e eutróficos, com horizontes A moderado e fraco, texturas argilosas e média.	Relevo do plano ao forte ondulado.
<i>Latossolos Vermelho</i>	São solos profundos e bem acentuadamente drenados, decrescentemente álicos, distróficos e eutróficos com horizonte A moderado, textura média, argilosa e muito argilosa.	Relevo plano e suave ondulado
<i>Planossolos</i>	Possuem mudança textural abrupta e horizontes subsuperficiais com colorações variegadas, predomínio de cores brunadas e acinzentadas, refletindo as condições de drenagem imperfeita, como consequência da posição na paisagem, normalmente em terços inferiores de encostas e nas baixadas, ocasionando um excesso de água principalmente durante o período das chuvas. O horizonte B é frequentemente de textura argilosa ou média, com estrutura forte prismática composta de blocos angulares ou subangulares muito plástico e muito pegajoso. O tipo de horizonte A dominante na área é o moderado, com textura mais leve (arenosa ou média) que o horizonte subjacente.	Ocorrem principalmente em relevo plano ou suave ondulado
<i>Cambissolos Háplico</i>	Estes solos são mal acentuadamente drenados, apresentando em muitos casos fase cascalhenta, pedregosa e/ou rochosa. São em ordem decrescente álicos (classes muito alto a alto para valor m e muito baixo para valor V), distróficos (classes médio para valor m e baixo a muito baixo para valor V) e eutróficos (classes baixa a muito baixo para valor m e alto a muito alto para valor V) sendo ainda largamente dominantes, o horizonte A moderado e a textura argilosa. Normalmente os cambissolos apresentam como principais obstáculos a sua exploração a pouca profundidade, fase cascalhenta ou pedregosa, baixa fertilidade natural (excetuando os eutróficos) e ocorrência em relevos mais movimentados.	As fases de relevo majoritárias são ondulado e forte ondulado.
<i>Argissolos Vermelho</i>	Apresentam-se como rasos a profundos e bem a moderadamente drenados. São decrescentemente eutróficos (classes muito baixas a baixo para valor m e alto para valor V), distróficos (classe médio para valor m e muito baixo a baixo para valor V) e álicos (classes alto para valor m e muito baixo a baixo para valor V), com predominância dos que apresentam argila de atividade baixa (Tb). Possuem horizonte A moderado, textura média/argilosa ou argilosa, e frequentemente com mudança textural abrupta. São solos de bom potencial produtivo no Estado excetuando aqueles localizados em regiões que apresentam período seco prolongado (principalmente nos eutróficos).	Relevos ondulado e forte ondulado.

<i>Neossolos Litólicos</i>	Apresentam normalmente rochosidade, pedregosidade, cascalhos e concreções, relacionados, via de regra, com a natureza do material originário. O horizonte A moderado predomina seguido do A fraco, sendo em ordem decrescente álicos (classes muito alto e muito baixo para valores m e V respectivamente), distróficos (classes médio e baixo para valores m e V respectivamente) e eutróficos (classes baixo e alto para valores m e V respectivamente); argila de atividade baixa e alta e textura média, argilosa e arenosa.	Ocorrência preponderantemente em relevo forte ondulado e montanhosos e geralmente associados a Afloramentos Rochosos
<i>Afloramento Rochosos</i>	Ocorrem como manifestações de vários tipos de rochas brandas ou duras, descobertas ou com reduzidas frações de materiais detríticos grosseiros de caráter heterogêneo. A cobertura vegetal mais comum é o tipo formações rupestres. Na maior parte das vezes chegam a estar associados a solos desenvolvidos, porém com distribuição dispersa o suficiente para constituir uma mancha independente.	Associados à relevos Forte Montanhosos à Escarpado.

**Figura 6.** Mapa de Classes de Solos presentes na bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha, MG, Brasil.



### 5.3. Mapa de Pluviosidade

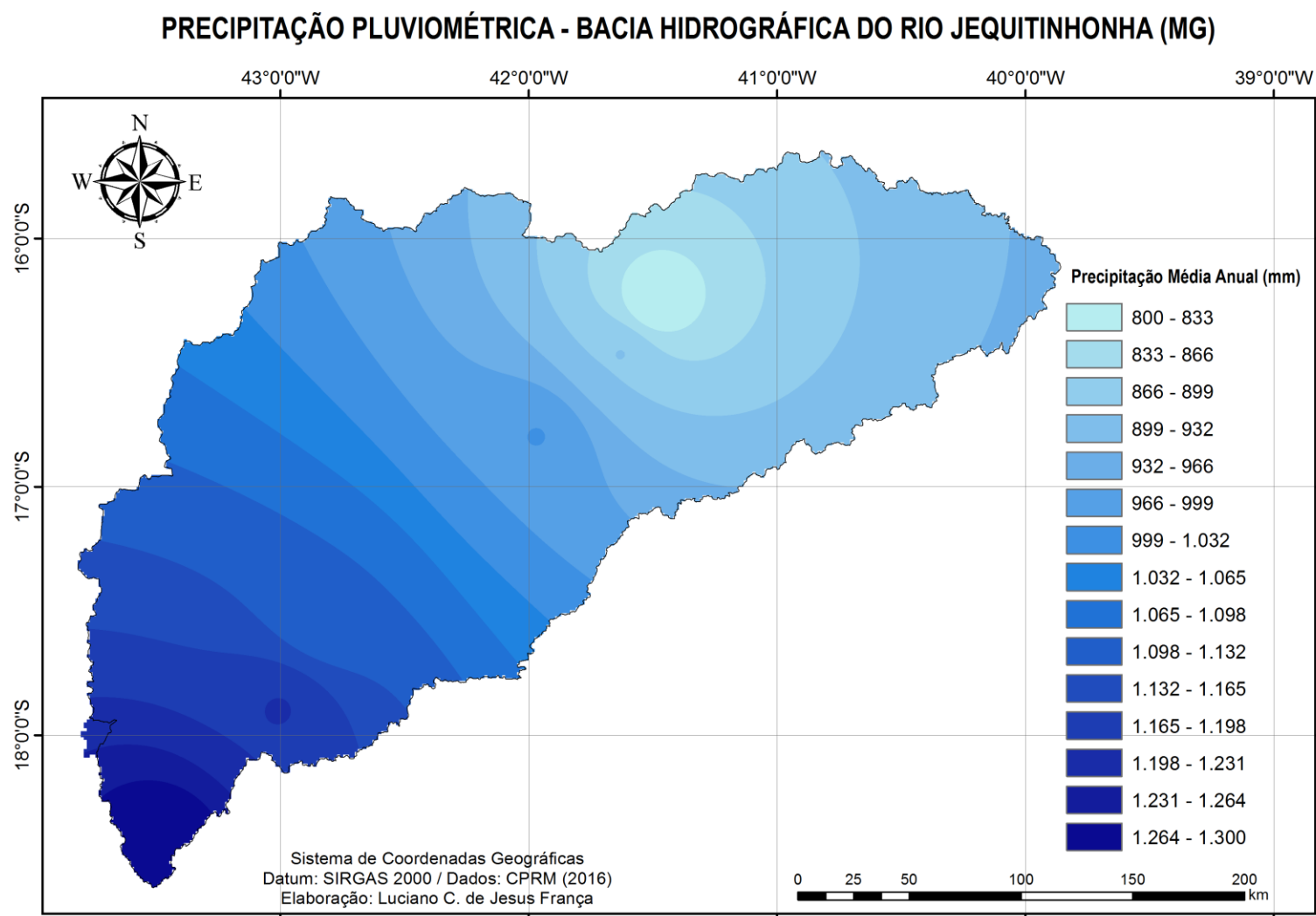
Com base nas considerações de Ross (1994; 2012), atribuiu-se os pesos de fragilidade da variável pluviosidade, em acordo com as variações existentes para a bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha. A área apresenta isoietas de precipitação média anual que variam de 800 mm no baixo Jequitinhonha a 1.300 mm no alto Jequitinhonha, considerando-se a série histórica de aproximadamente 27 anos utilizada neste estudo (Figura 7). Tais dados foram considerados na atribuição dos pesos de fragilidade ambiental dos quais a característica pluviométrica da região podem favorecer no ambiente a que se limita.

Pelo mapa da precipitação pluviométrica da bacia (Figura 7) considerou-se as precipitações de 800 à 999 mm como potencial condicionadora de uma fragilidade *baixa*, frente a condição de favorecimento à movimentação de solos por erosão hídrica, e, de 999 mm à 1.098 mm como *média*, como faixa de transição para a classe *alta*, que envolve as maiores precipitações, sendo entre 1.098 mm à 1.300 mm, as potenciais condições para fragilidade *alta* (Tabela 10). A atribuição das classes de fragilidade considerou ainda a percepção dos trimestres mais chuvoso e o menos chuvoso no período de 1977 a 2006, conforme apresentado na Figuras 8 e 9.

**Tabela 10.** Caracterização quanto a classificação da precipitação pluviométrica no contexto da fragilidade ambiental para a bacia do rio Jequitinhonha (MG), Brasil.

Pluviosidade (mm)	Classe Hierárquica
	Pesos Atribuídos - Fragilidade Ambiental
800 à 899	1 – Baixa
899 à 999	
999 à 1.098	3 – Média
1.098 à 1.198	4 – Alta
1.198 à 1.300	

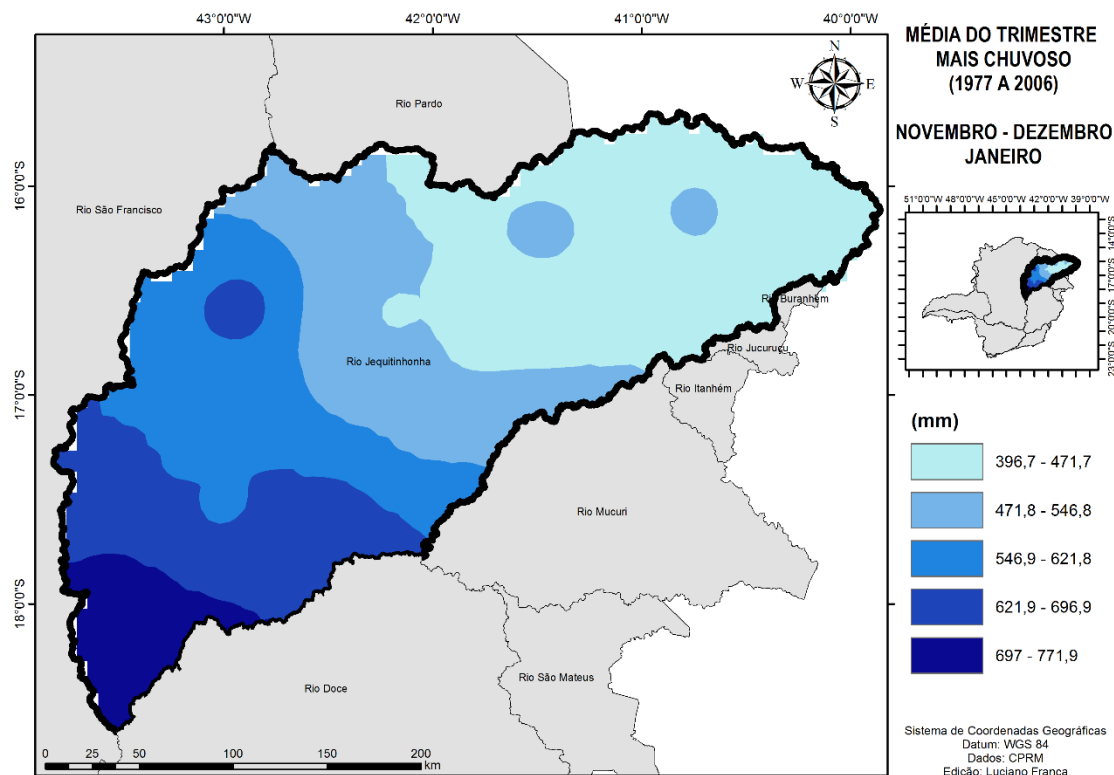
**Figura 7.** Mapa de Precipitação Pluvial da Bacia do rio Jequitinhonha, MG, Brasil





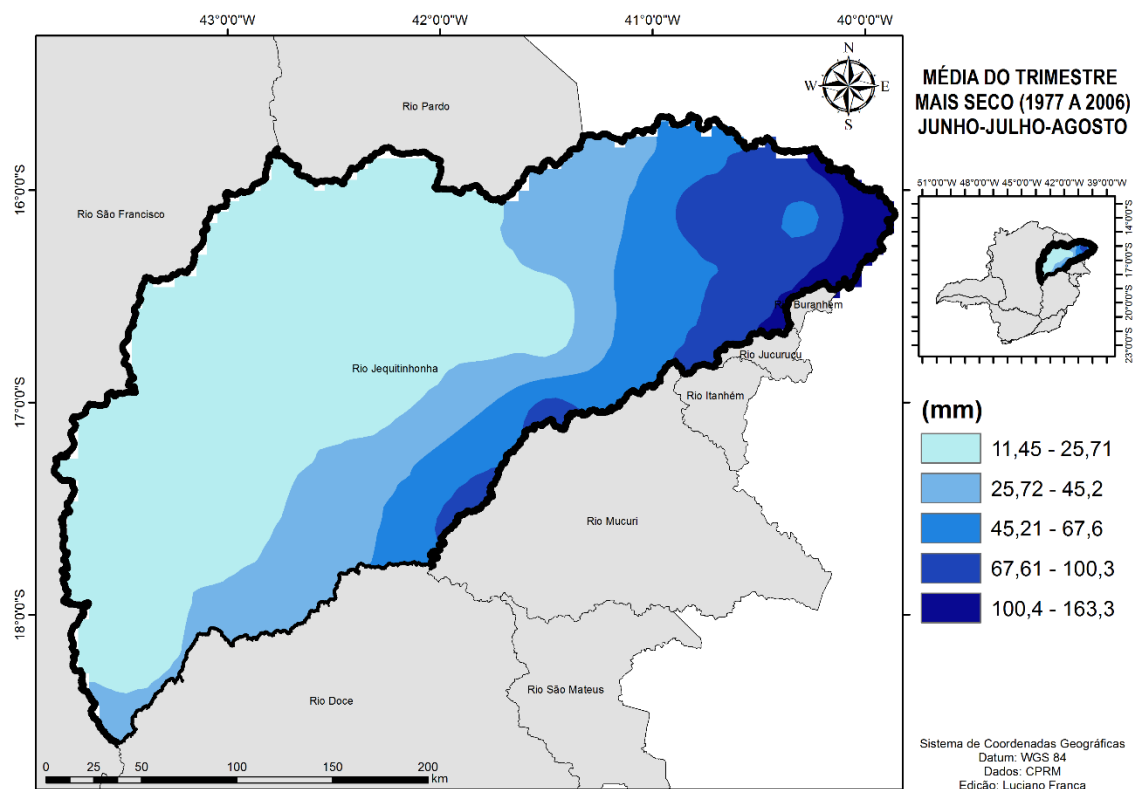
O trimestre mais chuvoso neste intervalo temporal (Figura 8) consiste dos meses de novembro, dezembro e janeiro, com maior precipitação na região do Alto Jequitinhonha, como médias entre 697 mm à 771,9 mm, e menores índices pluviométricos na região do Baixo Jequitinhonha, com médias de chuvas entre 396,7 mm à 471,7 mm.

**Figura 8.** Média do trimestre mais chuvoso na bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha (MG), entre 1977 e 2006.



O trimestre mais seco no intervalo temporal aqui considerado (Figura 9), consiste dos meses de junho, julho e agosto, com precipitações médias a variarem entre 11,45 mm à 163,3 mm.

**Figura 9.** Média do trimestre mais seco na bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha (MG), entre 1977 e 2006.



#### 5.4. Mapa da Hierarquia Fluvial

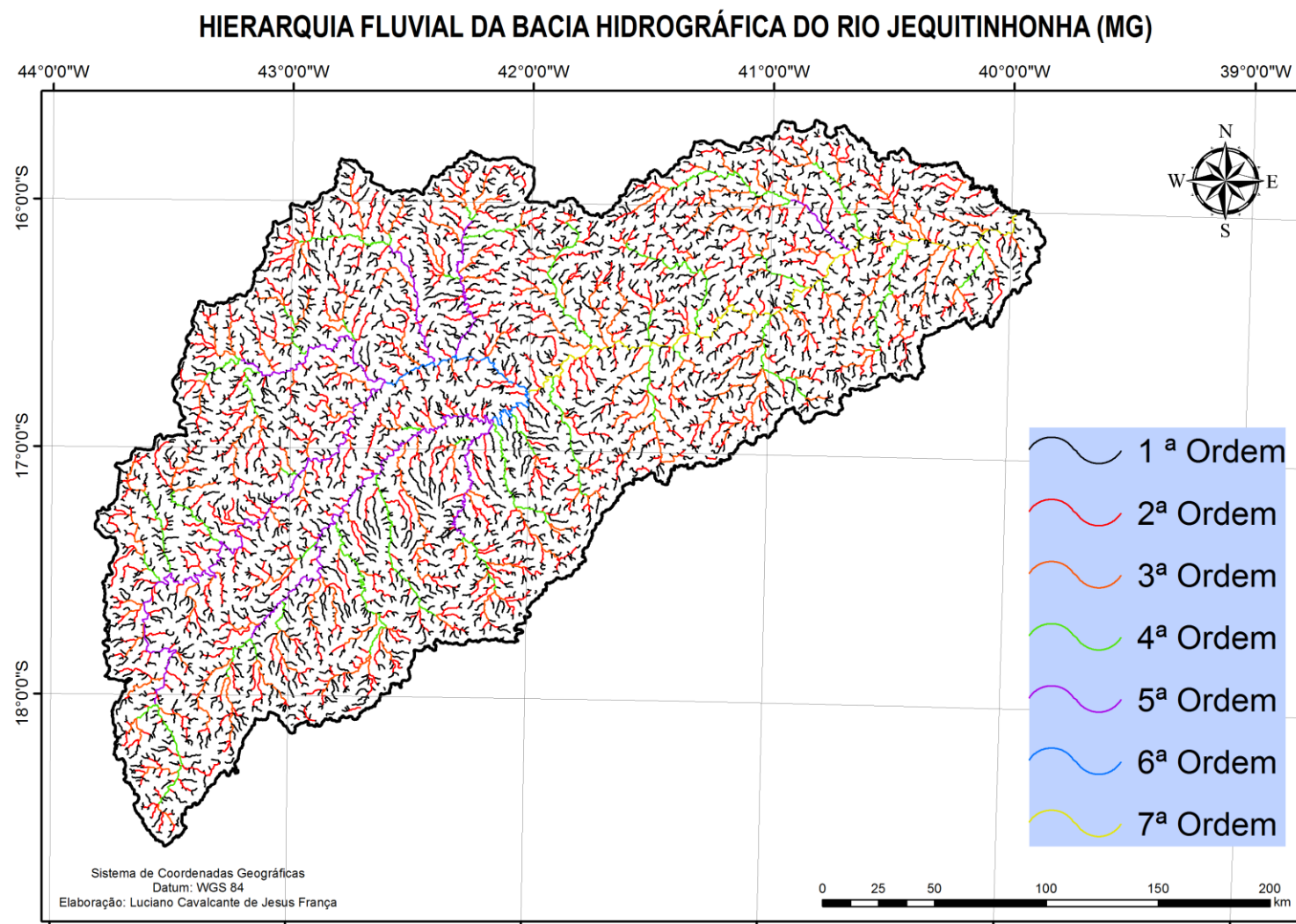
A bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha possui um comprimento total dos canais fluviais de cerca de 22.391,01 km. Verificou-se até a hierarquia fluvial de 7ª ordem, de acordo com o método de classificação de Strahler (1952) corroborando dados de Lopes *et al.*, (2016) para a porção cimeira Alto Jequitinhonha. A bacia apresentou maior distribuição espacial para leitos fluviais de 1ª ordem, aqueles que se estendem desde a nascente até à confluência, com somatória do comprimento total de 11.058,10 km, e os menores comprimentos de canais para as hierarquias de 6ª e 7ª ordens, com 139,9 km e 316,6 km, respectivamente. O comprimento total das ordens dos canais e os pesos atribuídos a fragilidade ambiental dos quais a hierarquia de drenagem pode favorecer, são apresentados na Tabela 11.

**Tabela 11.** Classificação da ordem dos canais de drenagem da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha (MG).

Hierarquia das drenagens	Comprimento Total dos Canais (km)	Classe hierárquica de fragilidade	Pesos atribuídos
1ª Ordem	11.058,10	<i>Extremamente Alta</i>	5
2ª Ordem	5.491,64	<i>Alta</i>	4
3ª Ordem	2.934,62	<i>Média</i>	3
4ª Ordem	1.471,18	<i>Média</i>	3
5ª Ordem	979,04	<i>Baixa</i>	1
6ª Ordem	139,9	<i>Baixa</i>	1
7ª Ordem	316,6	<i>Baixa</i>	1
<b>Total (<math>\Sigma</math>)</b>	22.074,36	--	--

O mapa final detalhado com a classificação da hierarquia fluvial da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha é apresentado na Figura 10.

**Figura 10.** Mapa de classificação da Hierarquia Fluvial de drenagem da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha (MG).



### 5.5. Mapa dos Domínios Geológicos

No mapeamento dos domínios geológicos, de acordo com os valores de vulnerabilidade sugeridos por Crepani *et al.* (2001) e de levantamento da Embrapa, desenvolvido por Quartaroli *et al.* (2013), verificou-se a presença de 7 (sete) classes, sendo elas: Domínio das coberturas Cenozoicas Detrito-Lateríticas (DCDL), Domínio dos Complexos Granitoides não deformados (DCGR1), Domínio dos Complexos Granitoides deformados (DCGR2), Domínio das Sequências Sedimentares Proterozoicas dobradas metamorfizadas em baixo grau a médio grau (DSP2) ao qual associa-se o DSP1 – Rochas sedimentares (Formação Salinas), Domínio das Sequências Vulcanossedimentares Proterozoicas dobradas metamorfizadas de baixo e alto grau (DSVP2), Domínio dos Complexos Granitoides intensamente deformados: ortognaisses (DCGR3) ao qual associa-se o CPG (Complexo de Paragnaisses) e, por fim, Domínio dos Complexos Gnaiss-Migmatítico e Granulitos (DCGML) (Figura 11).

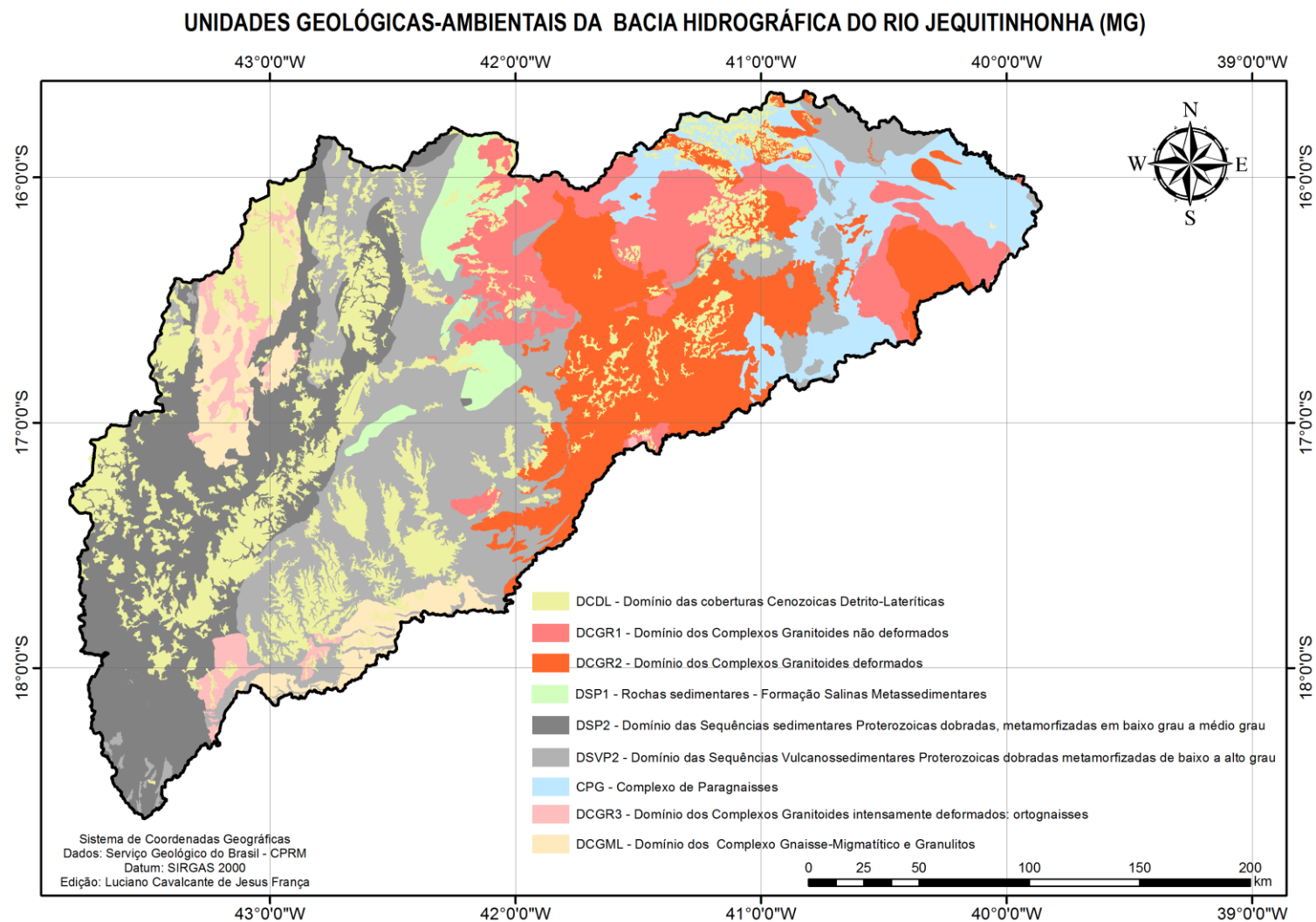
As fragilidades associadas às classes de domínios geológicos, são apresentados na Tabela 12.

**Tabela 12.** Pesos de fragilidade atribuídos aos domínios geológico-ambientais presentes na bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha (MG).

Classe*	Fragilidade	Pesos
DSVP2	<i>Levemente Baixa</i>	2
DSP2(+ DSP1)	<i>Média</i>	3
DCDL	<i>Alta</i>	4
DCGMGL	<i>Levemente Baixa</i>	2
DCGR2	<i>Baixa</i>	1
DCGR3(+CPG)	<i>Baixa</i>	1
DCGR1	<i>Baixa</i>	1

\***Nomenclaturas:** DCDL – Domínio das coberturas Cenozoicas Detrito-Lateríticas; DCGR1 – Domínio dos Complexos Granitoides não deformados; DCGR2- Domínio dos Complexos Granitoides deformados; DSP2 – Domínio das Sequências Sedimentares Proterozoicas dobradas, metamorfizadas em baixo grau a médio grau; DSP1 – Rochas sedimentares (Formação Salinas); DSVP2 – Domínio das Sequências Vulcanossedimentares Proterozoicas dobradas metamorfizadas de baixo e alto grau; DCGR3 – Domínio dos Complexos Granitoides intensamente deformados: ortognaisses; CPG – Complexo de Paragnaisses; DCGML – Domínio dos Complexos Gnaiss-Migmatítico e Granulitos.

**Figura 11.** Mapa dos Domínios das Unidades Geológicas da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha (MG).



### 5.6. Resultados: *Analytic Hierarchy Process (AHP)*

Esta etapa, precede a concatenação de todos os mapas de fatores gerados anteriormente, por meio da ferramenta de álgebra de mapas em ambiente SIG. Logo, para tal procedimento, foi realizada a análise de confronto entre os fatores, para a geração dos pesos de importância. Na Tabela 13 é apresentado a matriz matemática da comparação pareada entre os parâmetros analisados.

Os níveis de importância para a matriz de comparação par a par foram definidos para este trabalho tendo por base o julgamento técnico de especialistas de distintas áreas de pesquisa (Geomorfologia, Geologia, Pedologia e Engenharia Florestal), de acordo com o escopo do método.

Obteve-se como fator de maior relevância nesta avaliação de fragilidade ambiental, a declividade do terreno (Tabela 14), representando 45,8% de importância na para a avaliação multicritério, seguida respectivamente da Pluviosidade (27,8%), Hierarquia Fluvial (15,8%), Classes de Solo (7,7%) e com o menor peso os Domínios Geológicos (2,9%).

**Tabela 13.** Matriz de comparação pareada entre os parâmetros do estudo.

Matriz de Comparação Pareada					
	Classes de Solos	Declividade do Terreno	Domínios Geológicos	Pluviosidade	Hierarquia Fluvial
<b>Classes de Solos</b>	1	1/7	5	1/5	1/3
<b>Declividade do Terreno</b>	7	1	9	3	3
<b>Domínios Geológicos</b>	1/5	1/9	1	1/9	1/7
<b>Pluviosidade</b>	5	1/3	9	1	3
<b>Hierarquia Fluvial</b>	3	1/3	7	1/3	1
<b>Total (<math>\Sigma</math>)</b>	16,2	1,9	31,0	4,6	7,5

**Tabela 14.** Pesos finais por ordem decrescente de importância, numéricos e em porcentagem, respectivamente.

FATORES	PESOS FINAIS	PESOS PORCENTAGEM
Declividade do Terreno	0,458	45,8 %
Pluviosidade	0,278	27,8 %
Hierarquia Fluvial	0,158	15,8 %
Classes de Solos	0,077	7,7 %
Domínios Geológicos	0,029	2,9 %
<b>Total (<math>\Sigma</math>)</b>	<b>1,00</b>	<b>100%</b>

### 5.7. Resultado: Razão de Consistência AHP

O cálculo do Índice e Razão de Consistência da avaliação AHP realizada no estudo deu-se após o cumprimento dos procedimentos de estruturação da matriz principal comparativa, sua normalização e cálculo de autovetores necessários para encontrar-se o IC e RC. Para a aquisição dos valores referente ao vetor Eigen (Tabela 17), executa-se a razão entre os valores individuais de cada fator, pelo somatório de cada coluna na matriz principal inicialmente estruturada (Tabela 15).

**Tabela 15.** Matriz comparativa do grupo de critérios (Com valores não fracionados).

	Classes de Solos	Declividade do Terreno	Domínios Geológicos	Pluviosidade	Hierarquia Fluvial
<b>Classes de Solos</b>	1	0,143	5	0,2	0,333
<b>Declividade do Terreno</b>	7	1	9	3	3
<b>Domínios Geológicos</b>	0,2	0,111	1	0,111	0,143
<b>Pluviosidade</b>	5	0,333	9	1	3
<b>Hierarquia Fluvial</b>	3	0,333	7	0,333	1
<b>Total (<math>\Sigma</math>)</b>	<b>16,2</b>	<b>1,9</b>	<b>31,0</b>	<b>4,6</b>	<b>7,5</b>

Após a atribuição de pesos nas matrizes de prioridades, calculou-se os pesos relativos, denominado por Saaty (1991) como o processo de normatização da matriz (Tabela 16), onde calcula-se os autovetores, que resultam posteriormente no vetor de prioridade principal. Logo, divide-se os elementos de cada coluna pela soma daquela



coluna e somam-se os elementos em cada linha resultante, posteriormente divide esta soma pelo número de elementos da linha (Tabela 18).

**Tabela 16.** Matriz comparativa normalizada do grupo de critérios

	<b>Classes de Solos</b>	<b>Declividade do Terreno</b>	<b>Domínios Geológicos</b>	<b>Pluviosidade</b>	<b>Hierarquia Fluvial</b>
<b>Classes de Solos</b>	0,0617	0,0744	0,1613	0,0431	0,0446
<b>Declividade do Terreno</b>	0,4321	0,5207	0,2903	0,6459	0,4013
<b>Domínios Geológicos</b>	0,0123	0,0579	0,0323	0,0239	0,0191
<b>Pluviosidade</b>	0,3086	0,1736	0,2903	0,2153	0,4013
<b>Hierarquia Fluvial</b>	0,1852	0,1736	0,2258	0,0718	0,1338

O cálculo do Vetor de Eigen, resulta no somatório de cada valor encontrado na Tabela 17, dividido pelo  $n$  ( $n = 5$ ). Encontrado os valores de vetor de cada um dos fatores, realizou-se o cálculo de Eigen ( $\lambda_{Max}$ ), que consiste da aquisição da média das consistências, que é o somatório do produto de cada valor atribuído na comparação par a par, da Matriz principal de fatores de importância (Tabela 15), dividido pelo vetor de Eigen encontrado para cada fator. A média das consistências é apresentada na Tabela 19, assim como o Eigen Principal ( $\lambda_{Max}$ ), que é utilizado para a averiguação do Índice e Razão de Consistência.

**Tabela 17.** Cálculo do Vetor de Eigen (autovetores para cada parâmetro).

	<b>Cálculo</b>	<b>Vetor de Eigen</b>
<b>Classes de Solos</b>	$[0,0617 + 0,0744 + 0,1613 + 0,0431 + 0,0446] / 5$	0,0770
<b>Declividade do Terreno</b>	$[0,4321 + 0,5207 + 0,2903 + 0,6459 + 0,4013] / 5$	0,4581
<b>Domínios Geológicos</b>	$[0,0123 + 0,0579 + 0,0323 + 0,0239 + 0,0191] / 5$	0,0291
<b>Pluviosidade</b>	$[0,3086 + 0,1736 + 0,2903 + 0,2153 + 0,4013] / 5$	0,2778
<b>Hierarquia Fluvial</b>	$[0,1852 + 0,1736 + 0,2258 + 0,0718 + 0,1338] / 5$	0,1580

Na sequência, pôde-se constatar a consistência das matrizes, importante para se conhecer o grau de confiabilidade que um determinado conjunto de variáveis que pretende-se medir, onde a matriz principal de comparação pareada será consistente

somente se  $\lambda_{\text{máx}} \geq n$  (SAATY, 1991). A matriz do cálculo do valor de  $\lambda_{\text{máx}}$  é apresentada na Tabela 18, sobre a qual verifica-se  $\lambda_{\text{máx}} = 5,35$ , valor maior que  $n = 5$ . Logo a matriz principal de ponderação, apresenta-se consistente neste estudo.

Se a diagonal da matriz principal for de número com  $a_{ij} = 1$ , e se for uma matriz consistente, pequenas variações de  $a_{ij}$  manterão o maior autovalor próximo de **n**, e os autovalores restantes próximos a zero (SILVA, 2012), características as quais corroboram a avaliação deste estudo.

**Tabela 18.** Cálculo do Eigen Principal ( $\lambda_{\text{Max}}$ ) – Autovalor principal

	* CS	DT	DG	P	HF	Vetor de Eigen
CS	1	0,143	5	0,2	0,333	0,0647
DT	7	1	9	3	3	0,4951
DG	0,2	0,111	1	0,111	0,143	x 0,0296
P	5	0,333	9	1	3	0,2675
HF	3	0,333	7	0,333	1	0,1432
<i>Média das consistências</i>	5,144	5,603	5,115	5,584	5,303	<b>Eigen Principal <math>\lambda_{\text{Max}} = 5,350</math></b>

\*Nomenclaturas: CS – Classes de Solos; DT – Declividade do Terreno; DG – Domínio Geológico; P – Pluviosidade; HF – Hierarquia Fluvial.

Quando calculado se os dados são consistentes, encontrou-se o Índice de Consistência (IC), conforme apresentado na Equação (5):

$$IC = \frac{\lambda_{\text{Max}} - n}{n - 1} \therefore \frac{5,350 - 5}{5 - 1} \Rightarrow IC = 0,0875 \quad (\text{Equação 7})$$

De modo a verificar se o valor encontrado do Índice de Consistência (IC) é adequado, aplicar-se a Equação (6) para verificar a Razão de Consistência (RC), que consiste da divisão entre o IC, e o IR (Índice Randômico), verificado na tabela de Saaty (2005) (Tabela 5), de acordo com a dimensão da matriz (n), neste caso  $n=5$ , verifica-se um RI de 1,12, posteriormente aplicado à equação da RC

$$RC = \frac{IC}{RI} \therefore \frac{0,0875}{1,12} \Rightarrow RC = 0,0781 \quad (\text{Equação 8})$$

A Razão de Consistência (RC) encontrada foi de 0,0781, dentro dos limites aceitáveis (0,1) determinados por Saaty (1990). As comparações realizadas neste trabalho foram coerentes e geraram resultados confiáveis, confirmando que a matriz foi preenchida de maneira aleatória, logo, consistente.

### 5.8. Obtenção do mapa final de Fragilidade Ambiental Potencial (FAP)

Após a elaboração dos produtos intermediários que norteiam direta e indiretamente a análise da fragilidade ambiental potencial, os mapas de declividade, pluviosidade, hierarquia fluvial, classes de solos e domínios geológicos foram hierarquizados segundo os respectivos pesos de fragilidade para a derivação do mapa síntese (Fragilidade Ambiental Potencial - FAP).

A quantificação das áreas do mapa final de FAP é apresentado na Tabela 19. Constatou-se a maior percentagem de áreas sob fragilidade *Média*, contabilizando-se 30% da área de estudo, o que corresponde a 19.244,1 km<sup>2</sup> da bacia do rio Jequitinhonha. Já a fragilidade *Extremamente Alta* apresenta-se em menor proporção, totalizando a 5,3 % da área total, o que corresponde a 3.416,15 km<sup>2</sup>. Em contrapartida, 16,4% são terrenos sob *Alta* fragilidade. As classes *Baixa e Levemente Baixa*, corresponde à 19,4% e 28,9%, respectivamente.

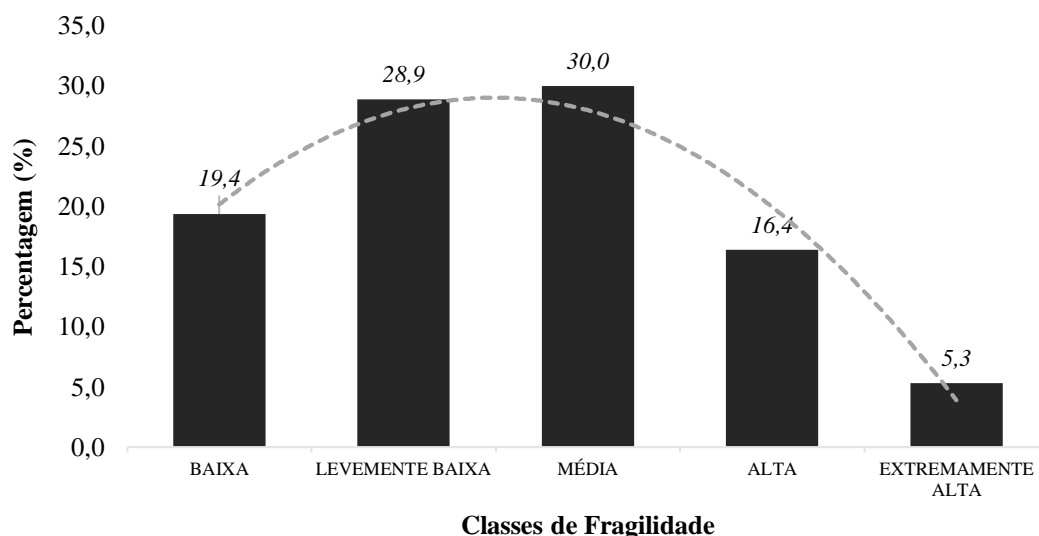
**Tabela 19.** Classe de Fragilidade Ambiental Potencial para a bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha, Minas Gerais.

Classe Hierárquica	Área (km <sup>2</sup> )
<b>Baixa</b>	12.430,57
<b>Levemente Baixa</b>	18.540,93
<b>Média</b>	19.244,07
<b>Alta</b>	10.519,63
<b>Extremamente Alta</b>	3.416,15
<b>Total</b>	64.151,35*

\*A área total obtida na análise multicritério não equivaleu exatamente a área da bacia hidrográfica do Rio Jequitinhonha na porção de Minas Gerais, que é de aproximadamente 66.319 km<sup>2</sup> segundo o IBGE, devido a imprecisões nas extensões geográficas dos Planos de Informações utilizados na análise, vindos da aquisição dos dados brutos, do processamento, manipulação, dentre outros. Portanto, a área calculada aqui, deve ser tomada como uma aproximação média.

A maior predominância diz respeito as classes de fragilidade *Média e Levemente Baixa*, conforme verificado no gráfico de relação das classes de fragilidade com a percentagem de área da bacia hidrográfica (Figura 12).

**Figura 12.** Relação das áreas em percentagem (%) e classes de fragilidade, com representação de linha de tendência do tipo polinomial, considerando-se que os dados flutuam, logo, há ganhas e perdas no conjunto de dados.

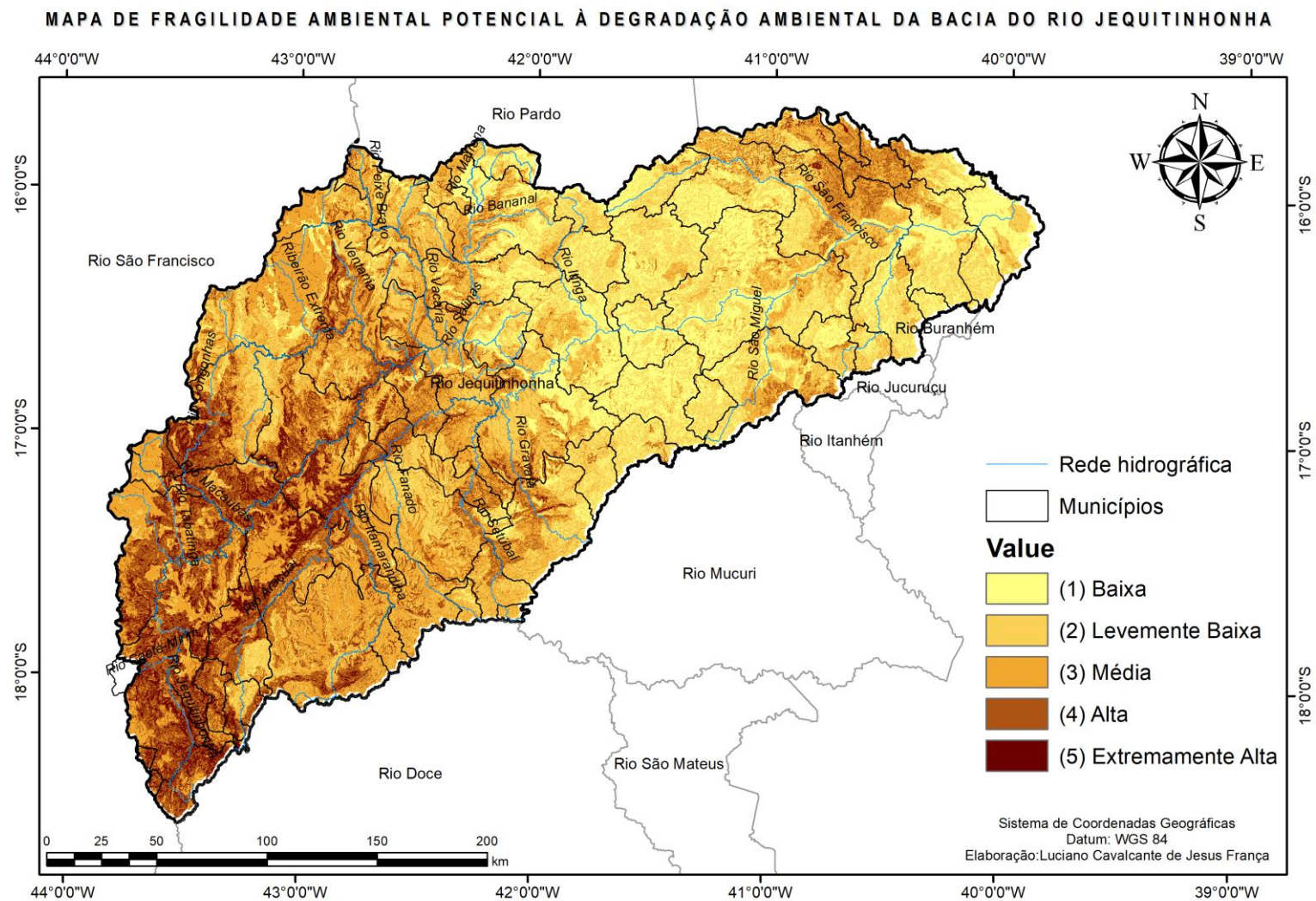


Como produto final, obteve-se o mapa temático final de FAP da Bacia Hidrográfica do Rio Jequitinhonha (Figura 13). Este expõe as cinco classes de fragilidade ambiental, onde as áreas em marrom escuro indicam risco iminente para atividades antrópicas, constatando altos valores de fragilidade ambiental. As áreas em coloração amarelo mais claro indicam as áreas de menores fragilidades.

As figuras 14, 17, 19, 22 e 23 apresentam a bacia hidrográfica setorizada, de modo a perceber-se em escala menor alguns maiores detalhes por amostra de região, englobando as zonas do Baixo, Médio e Alto Jequitinhonha. As figuras 15, 16, 18, 20, 21 e 24, apresentam pranchas com imagens do registro fotográfico realizado em campo, de modo a perceber-se as formas de ocupação e uso do solo, cobertura vegetal e demais aspectos fisiográficos verificados em distintos sítios da bacia hidrográfica.

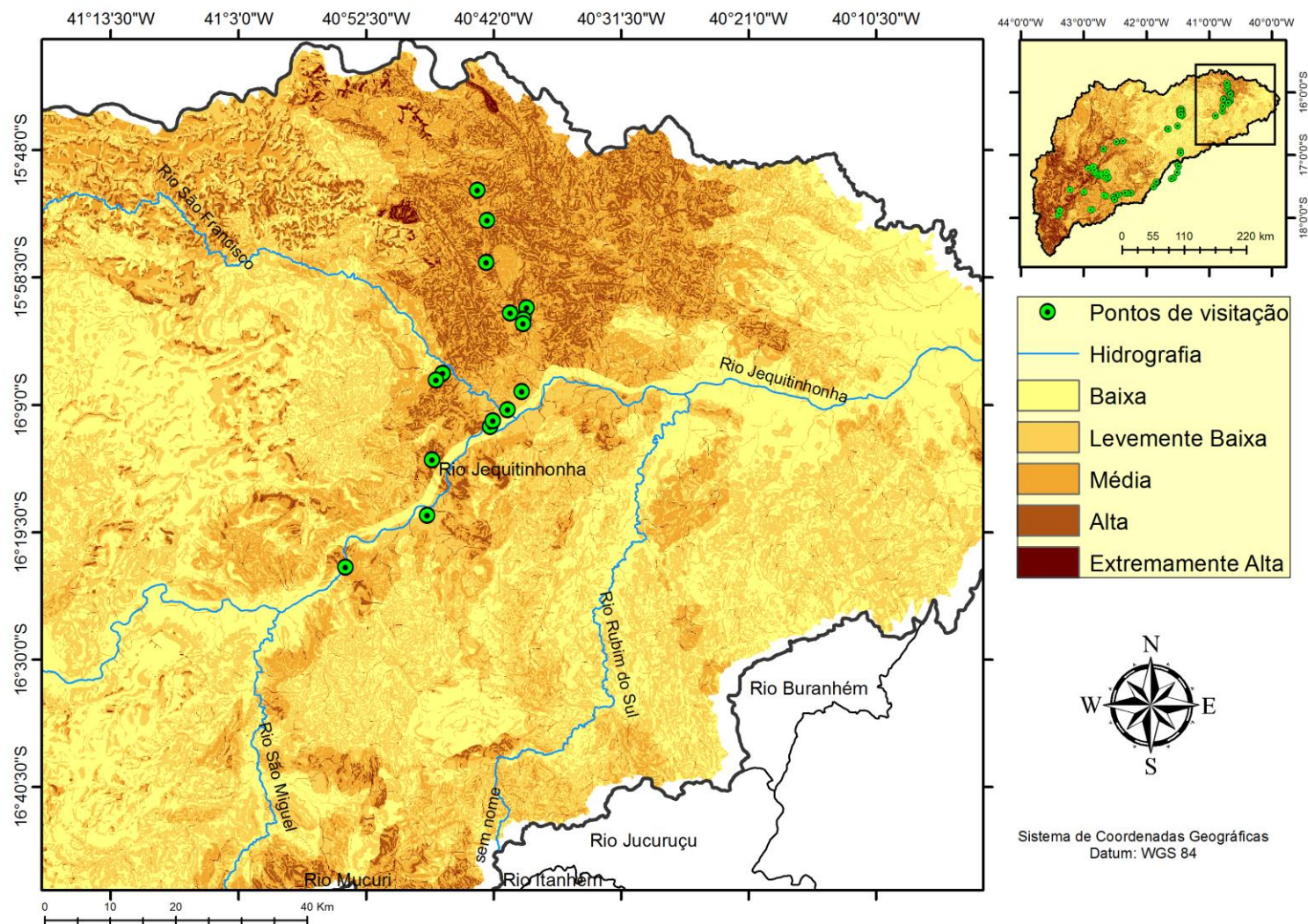
Na Tabela 20 elaborou-se uma relação entre os graus de fragilidade ambiental potencial e os possíveis cenários de degradação ambiental dos solos na bacia do Rio Jequitinhonha, bem como apresentou-se propostas conservação, recuperação e uso sustentável dos recursos. A tabela foi elaborada com base nas descrições Castro *et al*, (2015) e das classes de degradação de solos de Lal (1997), que variam de acordo com seus graus de resiliência, ou do potencial de recuperação.

**Figura 13.** Mapa final de fragilidade ambiental potencial da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha, Minas Gerais, com delimitação municipal.



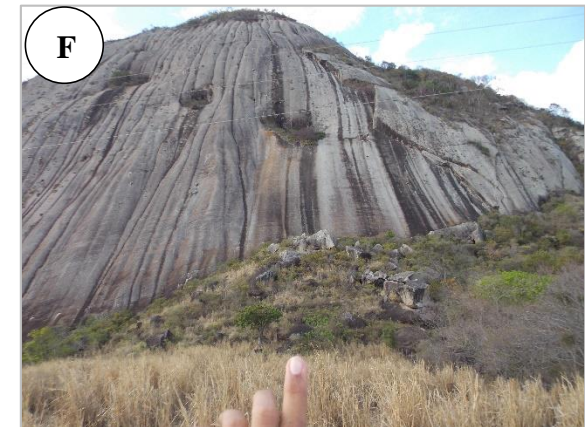
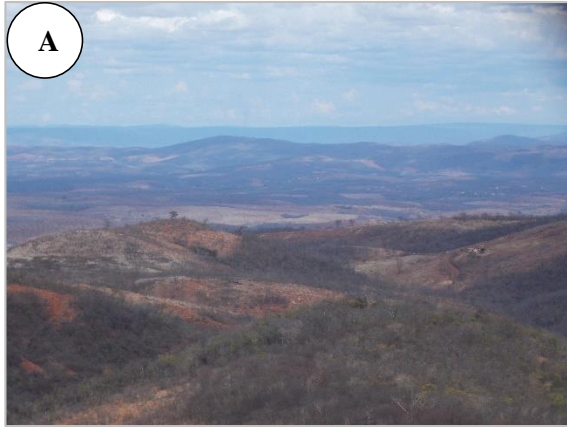


**Figura 14.** Mapa final de fragilidade ambiental potencial da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha, Minas Gerais (*Setor Baixo Jequitinhonha*).



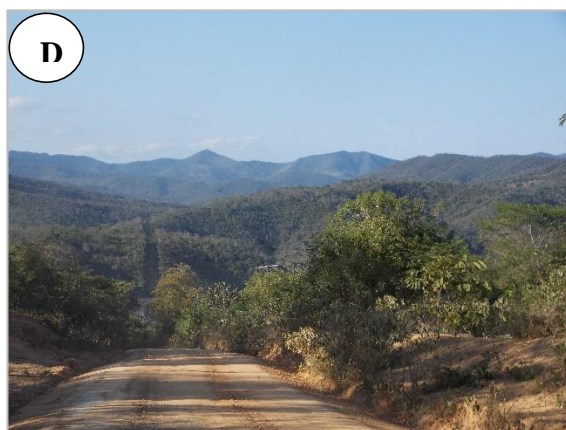


**Figura 15.** Zona semiárida (transição para domínio Caatinga) **(A)**; Vistas para moradias em ‘grotões’ e áreas com solos expostos e **(B)** e **(C)**; Solo exposto em Caatinga no Baixo Jequitinhonha **(D)**; Zonas classificadas com *Alta* fragilidade ambiental **(E)** e **(F)** localizadas no Baixo Jequitinhonha, imediações de Medina.



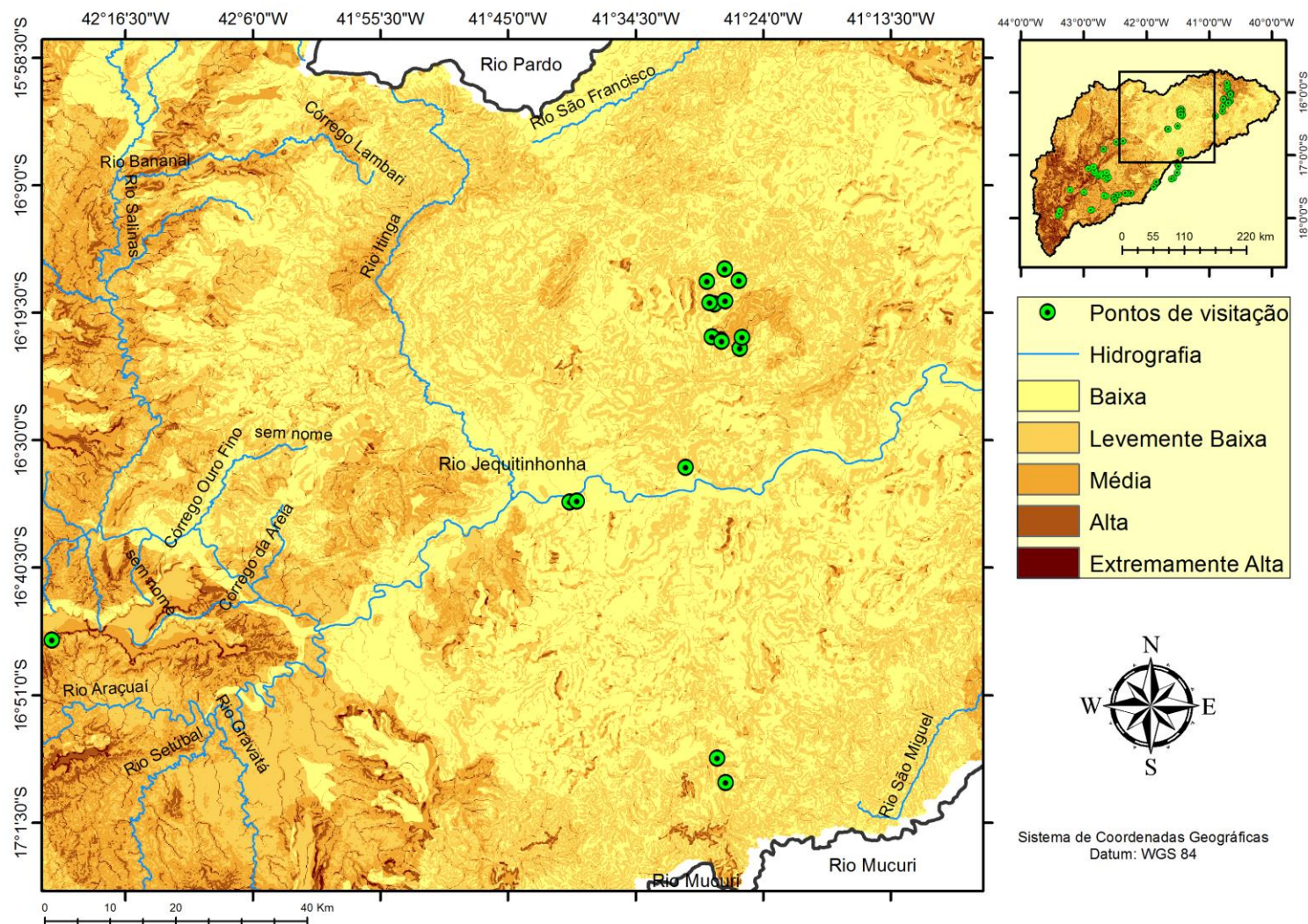


**Figura 16.** Zona com pastagens degradadas, vistas para ravinas de escoamentos superficiais (A); Solos expostos e declividades favoráveis à erosões (B) e (C); Transição para domínio Mata Atlântica no contexto da região entre Almerana e Bandeira (D), (E) e (F), em zona com manchas de *Alta* fragilidade ambiental.



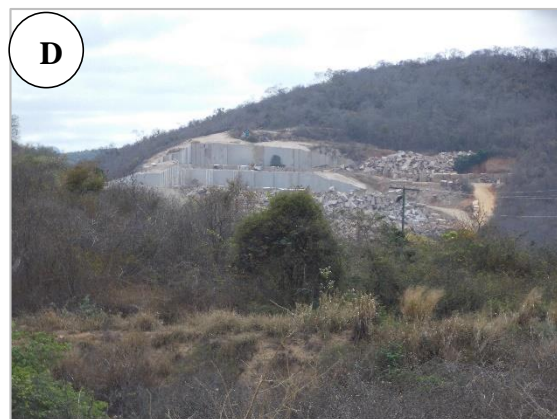


**Figura 17.** Mapa final de fragilidade ambiental potencial da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha, Minas Gerais (*Setor Baixo Jequitinhonha*).



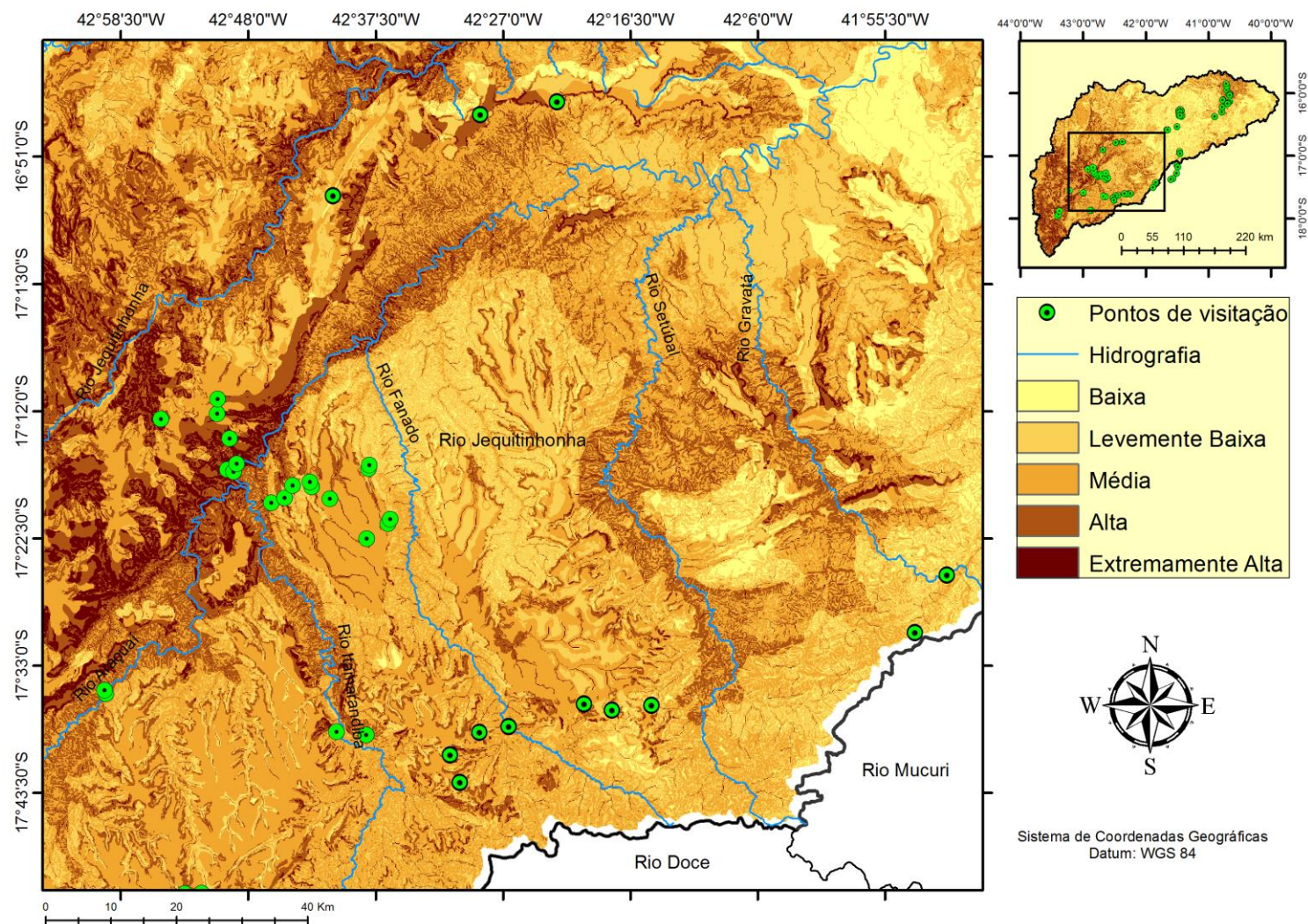


**Figura 18.** Vista para vertentes com início de processos erosivos provindos de escoamento superficial de áreas com solos expostos à degradação (A) e (B); Área com vegetação xerófila (C); Área de mineração, sítios próximos região entre Medina e Pedra Azul (D), (E) e (F).





**Figura 19.** Mapa final de fragilidade ambiental potencial da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha, Minas Gerais (*Setor Médio Jequitinhonha*).



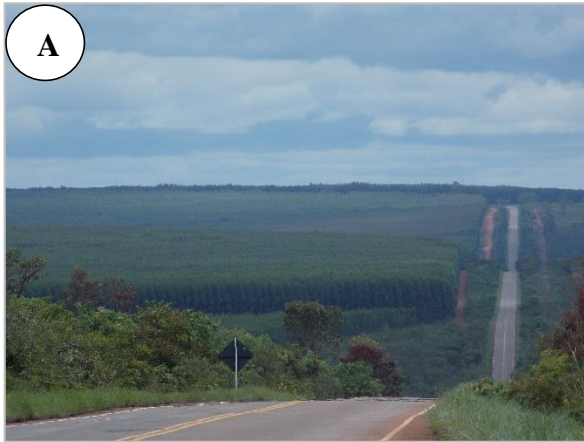


**Figura 20.** Solo Exposto sobre vertente declivosa (A); Destaque para povoaamentos de eucaliptos nas chapadas e comunidades nas baixadas (B) e (C); Áreas de reflorestamento comercial com espécies do gênero *Eucaliptos* spp. (D), (E) e (F). (Médio Jequitinhonha).

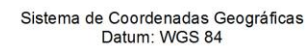




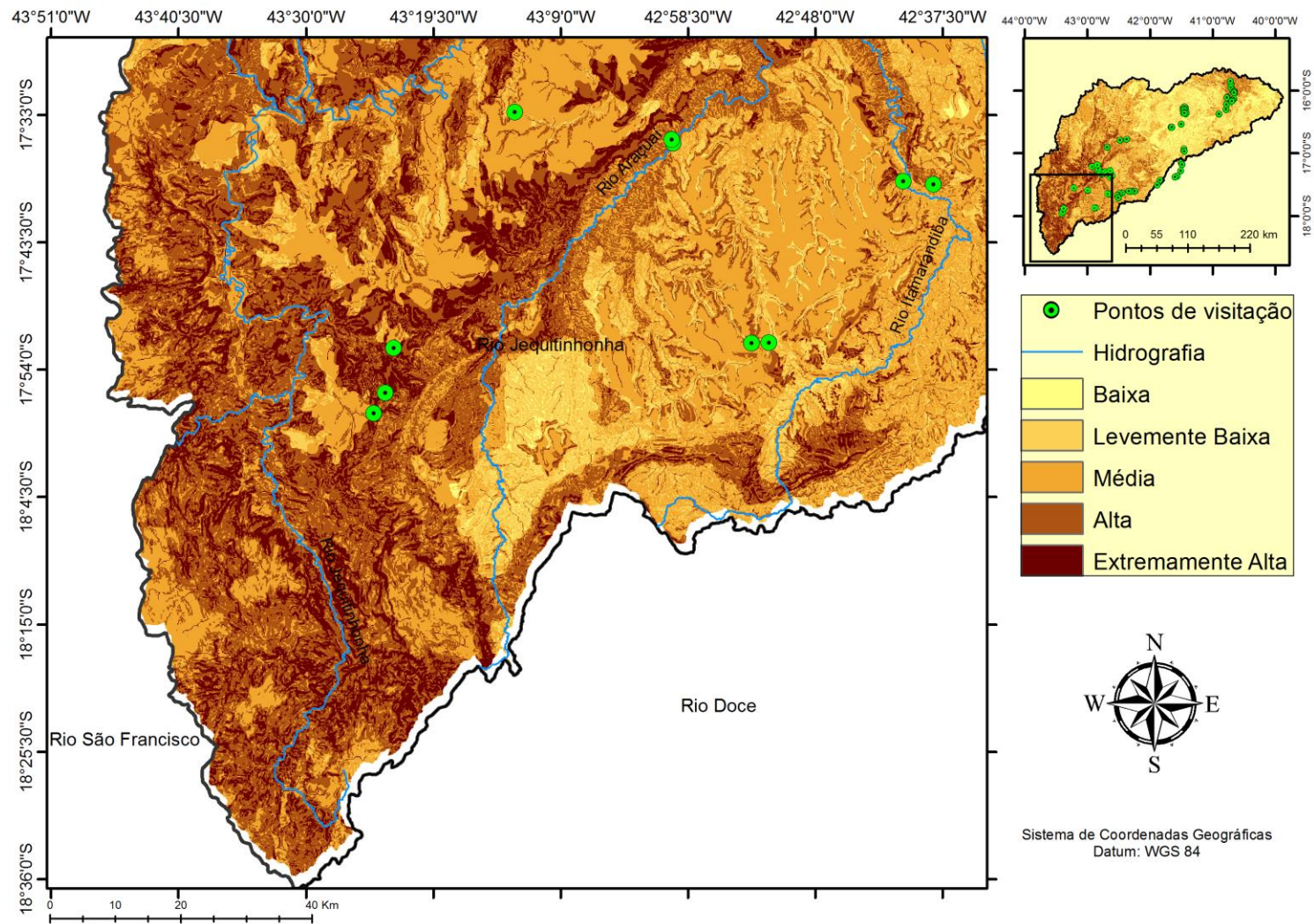
**Figura 21.** Zonas de ‘chapadas’ ocupadas por reflorestamentos (A), (B) e (C); Destaque para os processos de erosão regressiva junto às ‘chapadas’ (D); Manejo inadequado em plantio de café na região de Capelinha (MG) (E) e atividade pecuária (F). (Transição Médio para Alto Jequitinhonha).





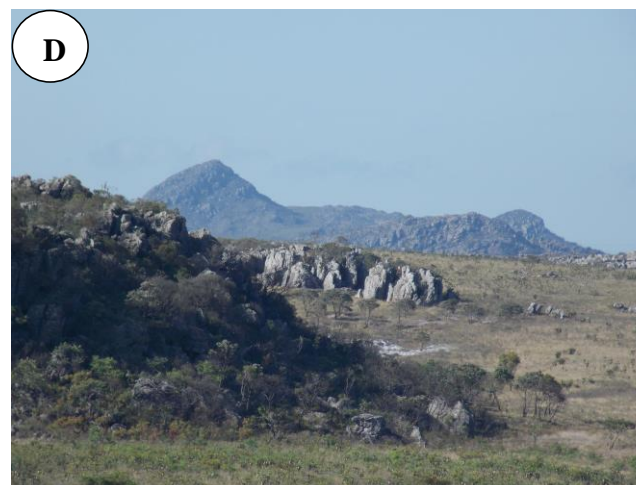


**Figura 23.** Mapa final de fragilidade ambiental potencial da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha, Minas Gerais (*Setor Alto Jequitinhonha*).



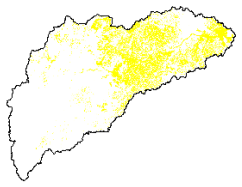
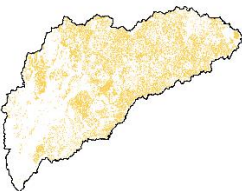
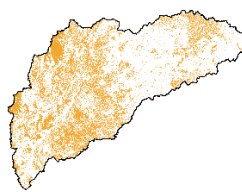


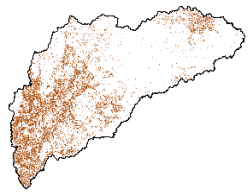
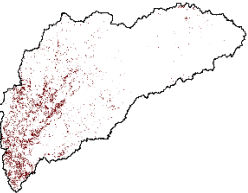
**Figura 24.** Vista para área de declividade acentuada e sob efeito de incêndios (A); Área com núcleo de vegetação mais adensada, nomeadamente “capões” (B); Vistas para conformação dos afloramentos rochosos predominantes na região do Alto Jequitinhonha (C) e (D).





**Tabela 20.** Graus de fragilidade ambiental potencial, cenários de potencial degradação dos solos na bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha, e propostas de conservação, recuperação e uso sustentável dos recursos. Adaptado de Castro *et al.*, (2015) e Lal (1997).

Grau de fragilidade ambiental		Degradação do solo		Resiliência	
		Susceptibilidade à degradação	Descrição	Descrição	Propostas para recuperação e uso sustentável dos recursos naturais
1		Resistente	Muito resistente ao estresse e muito estável	Altamente resiliente	Áreas de rápida recuperação, altamente tamponado; Conservação de remanescente vegetais/florestais existentes.
2		Ligeira	Resistente ao estresse e estável	Resiliente	Técnicas convencionais de recuperação com manejo apropriado.
3		Moderada	Suscetível ao estresse, com transição de estável para instável	Moderadamente resiliente	Lentamente recuperável; Manejo correto de pastagens para redução dos riscos de aumento da degradação do solo; Isolamento de pastos degradados para favorecimento da regeneração natural; Cultivo mínimo agrícola e para florestas plantadas;

4		Alta Altamente suscetível ao estresse e instável	Ligeiramente ou baixa resiliência  Lentamente recuperável, mesmo com mudança no uso do solo; Uso de práticas conservacionistas em atividades agrícolas; Reflorestamento com espécies nativas e cercamento de margens em córregos e entornos de nascentes antropizadas.
5		Extrema Extremamente suscetível e frágil	Baixa ou nenhuma resiliência  Efetiva recuperação pouco provável, mesmo com mudança no uso do solo; Áreas de prioridade máxima para conservação e proteção; Cumprimento Código Florestal para APPs de declividades, topo de morros, margem de rios e nascentes; Implementação de áreas destinadas a conservação dos recursos naturais.

## 6. DISCUSSÃO

### 6.1. Mapa de Declividade do Terreno

Embora esse parâmetro necessariamente não possa ser analisado de forma isolada, mas sim combinado com outros fatores, o resultado aqui obtido direciona para a importância da presença da cobertura vegetal em sítios declivosos, dada a significativa presença de relevo ondulado a forte ondulado na bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha. Este fator é diretamente relacionado aos processos erosivos, movimentação de massas e favorecimento de escoamento superficial das águas. A bacia hidrográfica apresenta 18,3% do seu território com declividades entre 20 e 30%, correspondente a cerca de até 17° de declive. Em concordância com Ross (1994) caracterizam-se como áreas já classificadas para fragilidade ambiental *Alta*.

Outros 9,2% do território da bacia, apresenta declividades acima de 30%, até 222% (Entre 17° à 65,7°), classificadas por fragilidade *Extremamente Alta*. Nestas, encontram-se as Áreas de Preservação Permanente (APP's) de encostas, com declividades acima de 45° que, segundo o novo Código Florestal, Lei 12.651, de 25 de maio de 2012, são áreas destinadas exclusivamente à proteção da vegetação nativa, devido sua suscetibilidade aos processos erosivos (BRASIL, 2012). Neste sentido, estudo desenvolvido por Scopel *et al*, (2013), constataram o desenvolvimento de processos erosivos em solos arenosos em situação de declividade de 3% sob sítios sem cobertura vegetal, destacando a possibilidade de alta suscetibilidade a erosão mesmo em relevos suave ondulado.

É possível verificar relevos declivosos com uma preponderância em determinados compartimentos da região do Baixo Jequitinhonha, distribuindo-se pelo leste da bacia, a encontrar-se com o Alto Jequitinhonha, e direcionando-se para algumas manchas de altos declives combinadas com áreas planas caracterizadas pelas 'chapadas', nomeadamente os planaltos da região do Médio Jequitinhonha. A Serra do Espinhaço, no Alto Jequitinhonha, configura-se sobre combinação de manchas de relevo fortemente ondulado, com vertentes íngremes à escarpadas, além de setores planálticos.

A declividade média de uma bacia hidrográfica é relevante na gestão e ordenamento de territórios, tanto para com o cumprimento do ponto de vista de legislação ambiental, quanto para garantir a eficiência de intervenções do homem no ambiente, assim como apresenta importante papel na distribuição da água entre o escoamento superficial e subterrâneo, dentre outros processos. A ausência de cobertura vegetal e

combinação ao tipo de classe de solo e intensidade de chuvas, dentre outros fatores, associados à maior declividade, pode conduzir a uma maior velocidade de escoamento, menor quantidade de água armazenada no solo e resultará em enchentes mais pronunciadas, sujeitando a bacia à degradação (TONELLO *et al.*, 2006). Lepsch (2002) destaca que, a declividade do terreno influencia na concentração, na dispersão e na velocidade de enxurradas e, em consequência, no maior ou menor arrastamento superficial das partículas de solo.

Para o mapeamento da fragilidade ambiental potencial, a declividade apresenta-se como um importante fator de análise, tendo em vista que, os processos erosivos que venham a ocorrer na região, podem ser acelerados conforme o grau de inclinação.

## 6.2. Mapa de Classes de Solos

Quanto aos solos verificados na área de estudo, há predominância dos Latossolos Vermelho-Amarelo, Argissolos Vermelho e Vermelho-Amarelo, bem como de Cambissolos Háplicos. Há ainda a presença dos Neossolos Litólicos e Afloramentos rochosos, especialmente na região referente ao Supergrupo Espinhaço. Não é apresentada classificação pedológica mais detalhadas no mapa síntese de ‘classes de solos’, em consequência das restrições de escala quanto ao nível de detalhamento. Contudo, todas as classificações de solos da área em estudo apresentam algum grau de limitação e fragilidade ambiental que, se explorados indevidamente, podem contribuir ao aumento do nível de degradação ambiental da sua estrutura e qualidade.

Os pesos de fragilidade em acordo com as características para cada classe de solos e fundamentados por Ross (1994) para estudos de fragilidade ambiental, constatou-se que as categorias de fragilidade *alta* e *extremamente alta* para classes de solos representam quase metade da percentagem (49,69%), salientando-se, assim, a necessidade de manejo e uso adequados.

Nota-se, na Tabela 9, quatro classes inclusas nas categorias *Extremamente Alta* fragilidade ambiental, representados pelos Argissolos Vermelho e Neossolos Litólicos. Os Argissolos Vermelhos aparecem em maior extensão (23,44% da área total), estes ocorrem em diferentes condições climáticas e de material de origem. Sua ocorrência está relacionada, em sua grande maioria, a paisagens de relevos mais acidentados e dissecados, com superfícies menos suaves (EMBRAPA, 2017). Tais solos tendem a ser suscetíveis aos processos erosivos devido à relação textural, que implica em diferenças de infiltração dos horizontes superficiais e subsuperficiais; e de acordo com as limitações supracitadas,

sua utilização exige um manejo adequado com a adoção de correção, adubação e de práticas conservacionistas para o controle da erosão (EMBRAPA, 2017). Entre as principais características dos solos, a análise de sua textura constitui-se no principal fator de suscetibilidade à erosão, Streck *et al.* (2002) cita que a textura afeta muitas propriedades químicas e físicas do solo, como a *capacidade de troca catiônica* (CTC), retenção de água, erodibilidade do solo, infiltração de água, drenagem, entre outras.

Os Neossolos, encontrados principalmente em associação a um mosaico de solos e afloramentos rochosos na Serra do Espinhaço, sobretudo sob ocorrência dos Complexos Rupestres de Altitude (BENITES *et al.*, 2007), são solos jovens, rasos, não apresentam horizonte B, e o horizonte A encontra-se assentado sobre a rocha ou sobre um horizonte C (< 50 cm) sobre a rocha. O fato da rocha se encontrar próxima da superfície impede a drenagem do solo, favorecendo sua saturação. Encontram-se normalmente em áreas declivosas, favorecendo o escoamento superficial e a ocorrência de erosão hídrica (BONNA, 2011).

Os Cambissolos também são considerados solos jovens, porém, mais desenvolvidos que os Neossolos. Desenvolvem-se, em sua maioria, em relevo declivoso favorecendo a gravidade que, por sua vez, enseja o desenvolvimento de movimentos de massa e dificulta a infiltração da água no terreno aumentando, portanto, seu escoamento e processos erosivos consequentes (BONNA, 2011).

Os Cambissolos e os Neossolos receberam grau de fragilidade *Alta* e *Extremamente Alta*, respectivamente, por serem solos rasos e relativamente novos, e com características de suscetibilidade que enquadram-os essencialmente nestas classes. Já os Planossolos, ocorrentes em apenas 0,03 % da bacia hidrográfica, receberam peso de fragilidade *Baixa*, por serem mais estáveis, localizarem-se em terrenos mais planos menos suscetíveis às ações erosivas, e pela baixa ocorrência na área de estudo.

Na bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha, as áreas com Latossolos, normalmente associadas a baixas declividades, estão destinadas principalmente ao reflorestamento com culturas de valor comercial, preponderantemente com espécies do gênero *Eucalyptus* spp. De acordo com Ferreira (2007), na bacia, os latossolos, em geral, encontram-se principalmente nos topos das chapadas, e o material de origem são os sedimentos predominantemente argilo-arenosos de coberturas detríticas. Eles ocorrem também associados aos conjuntos litológicos gnáissicos e graníticos e, em muito menor extensão, aos quartzitos do Supergrupo Espinhaço. A *Baixa* fragilidade para esta classe de solos dá-se ainda devido a sua textura argilosa e ao fato de baixa erodibilidade, pois, além de serem

bastante profundos, são compostos em grande parte por argilas, conferindo assim, características de maiores permeabilidades (FUSHITA *et al.*, 2011).

As considerações aqui realizadas corroboram com Ferreira (2011), que destaca que o relevo fortemente ondulado e os solos muito suscetíveis à erosão, são características presentes em todas as unidades de paisagem da bacia do rio Jequitinhonha.

### 6.3. Mapa de Pluviosidade

As principais características físicas das chuvas envolvidas nos processos de movimentação de solos ou erosões são a quantidade ou pluviosidade total, a intensidade ou intensidade pluviométrica e a distribuição sazonal (CREPANI *et al.*, 2001). Nesta investigação, por tratar-se de avaliação da fragilidade ambiental com escala de análise regional, considerou-se a pluviosidade total média em sua distribuição sazonal para o período de 1977 a 2006. Contudo, recomenda-se para avaliações mais detalhadas, a análise da intensidade pluviométrica, ou seja, a relação entre o quanto chove e quando chove, resultado que determina, a quantidade de energia potencial disponível para transformar-se em energia cinética (CREPANI *et al.*, 2001).

Neste estudo, considerou-se as regiões que apresentam os menores índices pluviométricos na série histórica utilizada, a atribuição de pesos de fragilidade entre *Baixa* e *Média*, considerando-se condição de maior estabilidade. Às unidades de paisagem natural localizadas na região de maior precipitação pluviométrica, sobretudo com menor duração de períodos chuvosos, atribuiu-se o peso de *Alta* fragilidade, ou seja, uma maior susceptibilidade no favorecimento em promover a erosividade dos solos. Logo, em concordância com Ross (2012), que caracteriza como nível hierárquico forte, situações pluviométricas maiores e com distribuição anual desigual, com período seco entre 3 e 6 meses.

A situação pluviométrica da bacia em questão caracteriza-se pela distribuição anual desigual, conferido em estudo de Ferreira; Silva (2012), que, além da grande variabilidade espacial, as chuvas são muito concentradas em alguns meses do ano, entre outubro e março. A partir de dados pluviométricos aqui utilizados, conferiu-se como os meses mais chuvosos no período histórico considerado, o período de novembro, dezembro e janeiro (Figura 8).

Panagos *et al.* (2017) destacam que o principal fator erosivo em regiões tropicais ou subtropicais úmidas pode ser considerada a ação das chuvas. Os autores, por meio de mapeamento da erosividade global, verificaram áreas em todo o planeta onde a chuva

tem maior potencial de causar movimentação do solo, e constataram que elas concentram-se na faixa tropical do planeta, especialmente nos países da América do Sul ( $> 3.700 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ), sendo a maior parte dessas áreas no Brasil ( $> 7.000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ).

O método utilizado para espacialização dos dados das estações pluviométricas mostra-se interessante ao uso, pela facilidade de manipulação e aplicabilidade em estudos em pequenas escalas. A metodologia baseada no interpolador IDW (*Inverse Distance Weighted*) utiliza-se de um modelo estatístico baseado na dependência espacial, ou seja, com base na suposição de que quanto mais próximo estiver um ponto do outro, maior deverá ser a correlação entre seus valores. Righi; Basso (2016) citam que o IDW é considerado o método mais simples de interpolação e o mais utilizado.

Os valores das características pluviométricas podem ser considerados representantes da erosividade da chuva, sendo assim, pode-se dizer que quanto maiores os valores da distribuição pluviométrica, maior é a erosividade da chuva (SPORL, 2007).

Contudo, destaca-se que o ponderamento para pluviosidade aqui realizado deve ser tomado como uma aproximação média da realidade, dada a grande extensão territorial da bacia do Jequitinhonha e de isoetas em escala menos detalhada. Arai *et al.*, (2010) citam que a erosividade da chuva depende ainda da intensidade na qual ocorre e da sua energia cinética, que determinam o trabalho erosivo das gotas de chuva sobre a superfície do solo. Todavia, Freitas *et al.*, (2001), destacam que as técnicas de espacialização, por meio dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG's), viabilizam a análise da forma como as precipitações se distribuem no espaço, assim como a associação com diversos fatores do ambiente, possibilitando estudos mais abrangentes, com rapidez e precisão.

Desta forma, considerou-se que, à medida em que aumentam-se as classes de precipitação na bacia do rio Jequitinhonha, aumenta-se a susceptibilidade do terreno a processos de erosão hídrica, sobretudo se estiver exposto, ou seja, sem cobertura vegetal. Freitas *et al.* (2001), Almeida *et al.* (2010) verificaram que variabilidade da erosividade segue a da precipitação, considerando que há uma significativa correlação entre a precipitação e o índice de erosividade. Esta correlação direta também foi observada por Oliveira *et al.* (2009), para região do Vale do Rio Doce (MG), onde os maiores potenciais erosivos da chuva, considerados mais críticos em relação à erosão hídrica, acontecem no período de maior ocorrência das chuvas, entre novembro a março.

#### 6.4. Mapa da Hierarquia Fluvial

A bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha apresentou hierarquia fluvial até a 7ª ordem, em acordo com o método de classificação de Strahler (1952), corroborando resultados de Lopes *et al.*, (2016) em estudos morfométricos para a porção cimeira da bacia do rio Jequitinhonha.

O critério de hierarquia fluvial foi acrescido neste estudo por perceber-se a sua importância na compreensão da fragilidade ambiental, sobretudo quando analisado em conjunto com os demais fatores. Vitte; Villela Filho (2006), pautados pelos conceitos de Christofolletti (1980), destacam que quanto maior a participação percentual de canais de primeira ordem, maior deverá ser a fragilidade potencial do relevo, pois a drenagem de primeira ordem indica uma maior instabilidade do ambiente, uma vez que a mesma representa os setores de desenvolvimento das bacias de drenagem e onde os processos morfodinâmicos associados à dissecação são mais intensos. A instalação da drenagem de primeira ordem e seu desenvolvimento está relacionada às variações do perfil de equilíbrio do canal principal ou mesmo às influências litoestruturais, estruturais e às variações climáticas ao longo do Quaternário.

Na área de estudo em questão, os canais de primeira ordem configuram-se associados principalmente às zonas de maiores altitudes, uma vez que correspondem as nascentes cujo volume de água ainda é baixo. Vitte; Mello (2013) observaram para a bacia hidrografia do rio Verde (SP), as maiores cotas altimétricas e o maior número de canais de primeira ordem, que conseqüentemente configuram uma maior susceptibilidade e/ou vulnerabilidade a processos morfogenéticos.

Estes canais de 1ª ordem correspondem a sistemas naturais caracterizados pela maior fragilidade, considerando-se o aspecto que representa os pontos de erosão regressiva dos perfis longitudinais e conseqüentemente o desenvolvimento areal da bacia como um todo. Atrelado a este fato, as cabeceiras correspondem a pontos de exfiltração do aquífero e conseqüente abastecimento dos canais fluviais, fato que deveria causar uma extrema preocupação ambiental por parte dos planejadores urbanos; um aumento da densidade urbana associado ao maior escoamento da água superficial pode acarretar a intensificação de processos erosivos nas cabeceiras de drenagem, com maior assoreamento para os canais, podendo resultar em situações de enchentes ou mesmo na instabilidade das construções. Outro aspecto relevante diz respeito à densa urbanização que pode acarretar uma diminuição da vazão dos “olhos d’água” ou até na extinção dos mesmos devido aos impactos provocados no gradiente hidráulico advindos da



urbanização, o que além de trazer prejuízos ambientais com a diminuição das águas nos canais, poderá provocar um reajuste no sistema canal-encosta, com processos erosivos nas encostas (VITTE; VILLELA FILHO, 2006).

Percebe-se ainda que, à medida em que o tamanho das ordens hierárquicas aumenta, a distribuição em área destas ordens diminui, demonstrando-se a grande quantidade de cursos hídricos de ordens menores (como 1ª e 2ª), referentes às zonas de cabeceiras dos rios (Figura 10). Quando analisado a formação geológica do terreno, sobretudo nas zonas planálticas da bacia hidrográfica, junto à sua configuração da hierarquia de drenagens, nota-se a captura de drenagem a ocorrer naturalmente, sendo responsável pelo surgimento de processos erosivos (erosão regressiva) no planalto e pelo transporte de material pelas vertentes até a planície (Figura 21-D). Tal processo remonta a importância de considerar-se as condições naturais da paisagem sob a qual decide-se desenvolver atividades economicamente ativas.

### 6.5. Mapa dos Domínios Geológicos

Verificou-se para a bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha em termos de fragilidade *Alta*, que, o domínio geológico de coberturas Cenozoicas Detrito-Lateríticas (DCDL), apresenta características de alta vulnerabilidade (QUARTOLI *et al.*, 2013; CREPANI *et al.*, 2001). Logo, tal classe foi pontuada neste estudo como a única classe de alta fragilidade ambiental, a corroborar com Sallun *et al.* (2008), os quais citam que coberturas detrito-lateríticas, além de coluviões e mantos de alteração podem ser mais susceptíveis a movimentos de massa, por serem considerados solos colapsáveis.

Os domínios DCGR1, DCGR2 e DCGR3 apresentam características que os enquadra em *Baixa* fragilidade, além de DCGMGL e DSVP2 como *Levemente Baixa*. Somente o grupo do domínio DSP2 enquadrou-se em *Média* fragilidade.

O grau de coesão representa a intensidade da ligação entre os minerais ou partículas que constituem as rochas e é a informação básica da Geologia a ser integrada a partir da ecodinâmica, uma vez que, em rochas pouco coesas devem prevalecer os processos erosivos, modificadores das formas de relevo (morfogênese), enquanto, em rochas bastante coesas, devem prevalecer os processos de intemperismo e formação de solos (pedogênese) (CREPANI *et al.*, 2001).

A contribuição da Geologia para a análise e definição da categoria morfodinâmica da unidade de paisagem natural compreende as informações relativas à história da evolução geológica do ambiente onde a unidade encontra-se e as informações relativas

ao grau de coesão das rochas que a compõem (QUARTOLI, *et al.*, 2013). Neste sentido, o critério domínios geológicos foi considerado neste estudo, por perceber-se a sua importância na compreensão da fragilidade ambiental natural de um ecossistema, alinhando-se ao que Crepani *et al.* (2001) destacam sobre a importância de se conhecer a história da evolução geológica de uma determinada região.

#### **6.6. Processo de Hierarquia Analítica (AHP)**

O Processo de Hierarquia Analítica (AHP) foi relevantemente essencial neste estudo, por considerar avaliações qualitativas e subjetivas como fatores quantitativos para o processo de tomada de decisão. Saaty (1980) destaca que o AHP é uma técnica de análise de decisão e planejamento de múltiplos critérios na qual sua aplicação reduz o estudo de sistemas complexos a uma sequência de comparações aos pares de componentes adequadamente identificados, ou seja, sua aplicação permite organizar hierarquicamente problemas complexos, envolvendo diversos critérios. Trata-se de um processo flexível que usa a estatística e ao mesmo tempo o conhecimento empírico dos usuários sobre o tema a ser analisado. O método pode ser considerado essencialmente eficiente, dado seu uso clássico em estudos que envolvem tomadas de decisão, apresentando-se como metodologia que presta-se a oferecer resultados mais confiáveis (SAATY, 2000).

Obteve-se como fator de maior relevância nesta avaliação de fragilidade ambiental, a declividade do terreno, com 45,8% de valor final de importância. Resultados encontrados por Miara e Oka-Fiori (2007) também obtiveram a partir da relação ponderada par a par, o maior peso de importância para a variável declividade (40% de importância) para região de relevo declivosos no estado do Paraná. Silva *et al.* (2016) para região do Alto Paranaíba (MG), também conferiram à declividade com maior peso de importância calculado (56,3%).

O fator ‘declividade’ recebeu o maior peso, já que é, dentre os fatores ambientais em análise, o de importância direta com relação à processos erosivos, movimentação de massas e pelo favorecimento de escoamento superficial das águas.

O fator ‘pluviosidade’ apresentou a segunda maior importância (27,8%), devido a estreita relação sobre os fatores ‘declividade’ e ‘solos’, sendo estes passivos e a pluviosidade agente ativo sobre estes nos processos de escoamento superficial e/ou favorecimento de erosões.

O fator ‘hierarquia fluvial’, sendo este um novo parâmetro testado neste estudo, apresentou a terceira maior importância (15,8%) da análise AHP, devido a predominância de canais fluviais de 1ª e 2ª ordens, 11.058,10 km<sup>2</sup> e 5.491,64 km<sup>2</sup>, respectivamente. Este resultado vai ao encontro de Christofolletti (1980), ao destacar que, quanto maior a participação percentual de canais de primeira ordem, maior deverá ser a fragilidade potencial do relevo. Segundo o autor, a drenagem de primeira ordem indica uma maior instabilidade do ambiente assim como representa os setores de desenvolvimento das bacias de drenagem onde os processos morfodinâmicos associados à dissecação são mais intensos.

O fator ‘solos’, apesar de ser o elemento que sofre diretamente a ação erosiva/degradativa, tendo relação direta com a fragilidade ambiental, em acordo com suas condições físicas e químicas, apresentou peso de relevância não incisivo (7,7%). Isto explica-se em função da escala de mapeamento utilizada e desenvolvida para o estado de Minas Gerais, pelo nível de detalhamento das classes de solos que não possibilitam afirmações mais precisas sobre as fragilidades envolvidas.

Os ‘domínios geológicos’ apresentam pouca participação percentual em importância na análise AHP (2,9%), uma vez que, embora seja a base de todos os demais fatores físicos, é um fator sob predominância de uma condição considerada mais estática, quando comparada aos outros fatores.

### **6.7. Razão de Consistência AHP**

A Razão de Consistência (RC) encontrada foi de 0,0781, dentro dos limites aceitáveis (0,10) determinados por Saaty (1990). Tal razão demonstra que as comparações realizadas foram coerentes e geraram resultados confiáveis, bem como confirma que a matriz foi preenchida de maneira aleatória, logo, consistente, não necessitando de reestruturação.

Outros estudos de análises multicritério para fragilidade ambiental com aplicação do método AHP, também chegaram a valores considerados excelentes, tais como Schimidt e Barbosa (2016) que encontraram consistência para matriz de comparações com variáveis parcialmente semelhantes às aquelas aqui utilizadas (Precipitação, Tipo de Solo, Uso de Solo e Declividade), encontrando-se uma RC de 0,0324. Gonçalves *et al.* (2016) encontraram em matriz de comparação pareada, uma razão de consistência de 0,016. Oliveira *et al.* (2009) obtiveram RC de 0,009, atestando-se assim a coerência na hierarquização dos dados.

### 6.8. Mapa final de Fragilidade Ambiental Potencial (FAP)

Como produto final, obteve-se o mapa temático de FAP da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha (Figura 13), importante ferramenta para nortear a gestão e ordenamento territorial da bacia hidrográfica, servindo de base para o desenvolvimento de políticas públicas por meio de zoneamento do território de acordo com suas potencialidades e fragilidades.

É possível verificar os locais com elevada probabilidade de ocorrência de processos degradativos, em função da maior fragilidade, conferindo-se que as classes *Alta* e *Extremamente Alta* correspondem a 21,7% da bacia hidrográfica. Entretanto percebe-se que a classe mais preponderante foi a de fragilidade *Média*, em que a combinação dos fatores envolvidos conferiu-lhes a uma mediana condição de fragilidade. Contudo, destaca-se que esta categoria já requer atenção do ponto de vista dos processos impactantes do ambiente, uma vez que incluem-se numa transição entre *Levemente Baixa* e *Alta* fragilidade. A classe *Média* corresponde, individualmente, a uma grande parcela de área, com 30% do território em análise, o que não implica necessariamente na sua permanência contínua, já que é influenciada diretamente pelo fator de ação antrópica, e pode, em avaliação de fragilidade emergente, responder diferentemente, dado as formas de uso e ocupação do terreno.

Conforme observado na figura 13, os sítios de fragilidade *Alta* e *Extremamente Alta*, refletem a combinação das características dos fatores que direcionam para tal resposta. Ressalta-se que o fator de declividade apresenta grande influência na determinação das zonas mais e menos frágeis (Figura 14), referente ao mapa de aproximação da região do **Baixo Jequitinhonha**, especialmente, locais onde observam-se os pontos de coordenadas de visitação. Verifica-se uma grande zona de entorno com variações entre *Baixa* a *Levemente Baixa*, contudo com um polígono de alta fragilidade, com variações entre *Média*, *Alta* e *Extremamente Alta*. Essa região, embora não apresente elevados índices pluviométricos que possam ter favorecido a possível situação an mala, apresenta concentração de manchas de elevadas declividades, conforme o mapa de declividade (Figura 3) e ao que foi constatado no diagnóstico de campo, condição que pode ter sido determinante para o resultado. Na Figura 15 (E e F) apresentam-se algumas das fisionomias observadas nessa região, que certamente favoreceram a condição apresentada de maior fragilidade, com a apresenta em partes dos ‘pont es’ rochosos altamente declivosos, todavia, não observados em demasiada concentração, mas sim em

organização mais espaçada. Entretanto, observou-se fisiografia de relevos mais acentuados no contexto da região entre os municípios de Almenara e Bandeira, conforme observados na Figura 16 (D, E, F), que refletem declividades acentuadas que resultaram nessa contribuição ao polígono de maior fragilidade na região.

Além disso, quando combinado com o fator de solos, o polígono de alta fragilidade da porção **Baixo Jequitinhonha**, apresenta um ‘bolsão’ de Argissolos vermelhos, conforme mapa de solos (Figura 6) caracterizados por atributos de extrema fragilidade ambiental. Neste caso, em menor participação, é possível que a hierarquia de drenagens também tenha contribuído para o polígono, uma vez que apresenta relativa concentração de drenagens de 1ª e 2ª ordens, que alimentam o rio Jequitinhonha.

A fragilidade ambiental está ligada à susceptibilidade do ambiente em sofrer intervenções, perturbações, ou de ser alterado. Quando o equilíbrio dinâmico é quebrado, o sistema pode entrar em colapso, passando para uma situação de susceptibilidade a degradação ambiental (SPORL; ROSS, 2004). As unidades de fragilidade potencial estão associadas aos ambientes estáveis que encontram-se em condições de equilíbrio dinâmico, portanto, que foram menos afetados, em sua estrutura e funcionamento, pelas atividades humanas. Embora apresentem condições de ambientes estáveis, possuem instabilidade potencial qualitativamente previsível face as suas características naturais e ao desenvolvimento das atividades humanas (SANTOS, 2015).

A desestabilização do ecossistema pode ter como indutores tanto processos naturais, o padrão considerado neste estudo, mas também quanto às ações antropogênicas, ou seja, como interferências antrópicas afetam um ambiente sob determinada fragilidade natural. Assim, dentre os principais e mais frequentes riscos, destacam-se as erosões, deslizamentos de encostas declivosas, assoreamento de cursos hídricos, dentre outros, que levam a perda da biodiversidade, da qualidade ambiental dos solos e cobertura vegetal. Fatores estes que corroboram com as concepções de Tricart (1977) quando destaca a importância de se conhecer a instabilidade de um ambiente em projetos de planejamento ambiental, e com Ross (1994), ao considerar a relevância do estudo integrado de elementos componentes do estrato geográfico.

É possível observar, especialmente nas zonas sul e sudeste do **Alto e Médio Jequitinhonha**, a existência de manchas de alta fragilidade em associação com a projeção dos cursos d’água, condição também observada em estudo desenvolvido por Alves *et al.* (2017). Tal fato remonta à importância da cobertura florestal em bordaduras dos cursos hídricos, sobretudo com a existência das Áreas de Preservação Permanentes (APP) cuja

vegetação deve ser mantida, conforme a Lei nº 12.621, de 25 de maio de 2012, referente ao novo ‘Código Florestal Brasileiro’, para preservação dos recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade, assim como facilitar o fluxo gênico de fauna e flora, proteger os solos e assegurar o bem-estar social. Ainda nesta região específica em evidência, predominam atividades minerárias, com destaque para a exploração de diamante, ouro, quartzo e, especialmente, pedras coradas na sub-bacia do Rio Araçuaí. Embora menos expressivos, sobressaem o setor industrial nos ramos alimentício, cerâmico e têxtil, e a silvicultura, concentrando-se também no alto e médio curso. Já a agricultura e pecuária, desenvolvidas em toda a parte mineira da bacia, são mais voltadas à subsistência (IGAM, 2005).

A área amostral representada na aproximação da Figura 17, referente à região do **Baixo Jequitinhonha**, trata da zona com os menores graus de fragilidade ambiental de toda a bacia, dado as combinações menos prováveis de características que condicionam à fragilidade. Nesta região predominaram classes de fragilidade relativamente baixas, indicando que há uma relação entre a ocorrência de uma combinação de Argissolos Vermelho Amarelo (*Média Fragilidade*), Latossolos Amarelo e Vermelho Amarelo (*Baixa Fragilidade*), com a predominância de baixas declividades, baixo índice pluviométrico e maior frequência de domínios geológicos de baixas fragilidades, como os Domínios dos Complexo Granitóides deformados (DCGR2) e Domínio dos Complexos Granitóides não deformados (DCGR1). Nesta porção do baixo Jequitinhonha, o relevo mais aplainado pode favorecer a infiltração da água no solo, impedindo o escoamento superficial, o que resulta em menores taxas de erosão.

Entretanto, na Figura 19 (**porção Médio Jequitinhonha**), quando o declive aumenta, de ondulado à forte montanhoso, mostram-se maiores fragilidades, favorecendo-se o aumento do escoamento superficial e consequentemente redução da taxa de infiltração de água no solo, e maior escoamento da água. Esse fator pode favorecer a ocorrência de processos erosivos, podendo resultar no surgimento de sulcos, ravinas e voçorocas. Verifica-se ainda nas encostas das ‘chapadas’, manchas de alta fragilidade ambiental, potencializadas pela combinação dos fatores, em especial do processo de erosão regressiva visto em resposta à hierarquia das drenagens. Tal cenário pode ser observado na Figura 21 (B e D). Nas ‘chapadas’ predominam as atividades ligadas a silvicultura de produção (Figura 20 – B, C, D, E e F) e (Figura 21 – A, B e C).

Alguns embasamentos auxiliam a compreensão da Fragilidade Ambiental Potencial (FAP), tais como as concepções de Tricart (1977), ao tratar das Unidades

Ecodinâmicas de Instabilidade Potencial, em equilíbrio dinâmico em seu estado natural, porém, há uma instabilidade potencial com a possibilidade da intervenção antrópica. O mesmo autor contextualiza as Unidades Ecodinâmicas de Instabilidade Emergente, definidas como os ambientes naturais que foram modificados intensamente pelo homem por meio de desmatamentos, agriculturas, industrialização e urbanização, portanto, denominados ambientes antropizados. Entretanto, além destes embasamentos, Crepani *et al.* (2001) considera que uma unidade de paisagem natural é considerada *estável* quando os eventos naturais que nela ocorrem favorecem os processos de pedogênese, isto é, o ambiente favorece a formação e o desenvolvimento do solo, os quais se apresentam bastante desenvolvidos, intemperizados e envelhecidos. Já uma unidade de paisagem natural pode ser considerada *vulnerável* quando prevaleceram os processos modificadores do relevo (morfogênese) e, por isso, existe um predomínio dos processos de erosão em detrimento aos processos de formação e desenvolvimento do solo.

É praticamente impossível estabelecer uma linha divisória entre o que é erosão natural e o que é erosão induzida pelas atividades antrópicas. Neste sentido, o correto é considerar-se que o processo natural de erosão é acelerado pelas atividades do homem, e que a principal questão, é saber qual o nível de erosão a partir do qual a capacidade do solo em sustentar a vida fica prejudicada e o material transportado para fora da área de erosão vai provocar problemas em outro local (CREPANI *et al.*, 2001).

Nota-se que na região ao sul da bacia (Figura 23), referente a porção do **Alto Jequitinhonha**, há uma preponderância das classes de fragilidade potencial compreendidas entre *Altas* e *Extremamente Altas*. Este predomínio ocorreu em função da combinação de todos os demais fatores, onde as declividades são relativamente acentuadas (Figura 24 – A, C, D), os Neossolos e Cambissolos, característicos pelas suas fragilidades, além de sítios com afloramentos rochosos e a alta presença de drenagens de ordens 1 e 2. Além disso é a zona da área de estudo com os mais altos índices pluviométricos registrados, e apresentam também a influência do aspecto geológico, com a predominância dos domínios das sequências sedimentares proterozoicas dobradas, metamorfizadas em baixo a médio grau (DSP2), e Domínios de coberturas cenozoicas Detrito-Lateríticas (DCDL).

Na região do **Alto Jequitinhonha**, especialmente no contexto da Serra do Espinhaço, em virtude da sua alta fragilidade, remonta-se à necessidade da devida atenção e proteção para com o ecossistema dos Complexos Rupestres, dado à vulnerabilidade ambiental sobre a qual estão expostos e sujeitos quanto aos impactos ambientais

decorrentes da exploração antrópica. Benites *et al.* (2003) ressaltam que, em virtude das elevadas altitudes, do relevo movimentado desta região e da pouca espessura do *solum*, associados à pobreza do material de origem, especialmente nas áreas de rochas quartzíticas, estas apresentam um alto índice de erosão, com elevadas perdas por lixiviação. A antropização desses ambientes nestas condições podem ocasionar problemas ambientais irreversíveis.

Ribeiro e Freitas (2010) destacam que os complexos rupestres apresentam alta riqueza de espécies em escala local e regional e numerosos relictos e endemismos. Esses refúgios montanos, que são de especial interesse para a conservação sob vários aspectos, como recarga e regulação hídrica, contenção da erosão e do assoreamento, singularidade biológica e valores recreativos, enfrentam diversas ameaças, como erosão e instabilidade do solo, expansão urbana e agropecuária, incêndios, retirada de plantas ornamentais e mineração. Além disso, encontram-se entre os ecossistemas brasileiros mais vulneráveis às mudanças climáticas globais, pelo fato que com o aumento da temperatura não haverá possibilidade de migração para altitudes mais altas (RIBEIRO; FREITAS, 2010).

A ocorrência de espécies da flora ameaçada de extinção leva em consideração aspectos biológicos, ecológicos e ameaças que afetam a sobrevivência de espécies na natureza e encontram-se inclusas no “Livro Vermelho da Flora do Brasil” (MARTINELLI; MORAIS, 2013). Para a área de estudo, 1.315 espécies da flora ameaçadas, no contexto da bacia hidrográfica, com 447 classificadas como *vulneráveis*, 138 como *criticamente em perigo* e 730 *em perigo* (MARTINELLI; MORAIS, 2013), contudo com demasiado adensamento sobre a região do Supergrupo e sítios do alto Jequitinhonha, áreas constatadas neste estudo com fragilidade ambiental entre *Alta* e *Extremamente Alta*. Tal fato requer bastante atenção do ponto de vista da conservação ambiental, concordando com Gontijo (2008), o qual considera em estudo sobre a Serra do Espinhaço, em sua porção mineira, que aparece como uma das áreas prioritárias de conservação, com importância biológica especial.

Todo o entendimento da fragilidade ambiental natural direciona a compreensão da importância da cobertura vegetal sobre os territórios, ou seja, para um ambiente naturalmente frágil é altamente relevante a necessidade de conservação e/ou proteção da cobertura vegetal, independente da sua densidade e processos ecológicos envolvidos, com exceção das coberturas vegetais temporárias de caráter comercial, sobre as quais envolve-se revolvimentos frequentes da estrutura da camada fértil de solo.



A cobertura do terreno é um fator de proteção da paisagem contra os processos morfogênicos que se traduzem na forma de erosões (Crepani *et al.* 2001), por conta disso o autor em suas recomendações sobre vulnerabilidade de solos a erosão, considera valores atribuídos próximos da estabilidade, na escala de vulnerabilidade, para altas densidades de cobertura vegetal, de tal forma como Ross (1994), considera em os estudos de fragilidade ambiental, para terrenos com coberturas vegetais densas, como grau *muito alto* de proteção, consequentemente com baixas possibilidade de indução à fragilidades ambientais altas, incluindo-se inclusive as coberturas densas de caráter comercial, tais como as florestas plantadas.

A vegetação tem importante função na estabilização dos solos sobre terrenos de alta fragilidade ambiental, Valente; Vettorazzi (2005) ressaltam que a fragmentação florestal antrópica é uma das principais causas de alterações, tanto na estrutura como nos processos de paisagens. Neste sentido, a priorização de áreas representa um dos métodos mais efetivos e econômicos para o planejamento, a otimização e o sucesso de ações de conservação e preservação florestal, que visam ao incremento da biodiversidade regional.

Quando protegido pela cobertura vegetal, o escoamento das águas que atinge a superfície do solo é lento, e parte dessa água fica interceptada pela cobertura florestal e serapilheira. Tal condição verificada por Miyata *et al.* (2009), onde foram comparados os valores de erosão anual em parcelas com diferentes tratamentos, em que constatou-se que em parcelas com o chão coberto diminuíram-se as chances de despendimento do solo por gotas de chuva em 95%, demonstrando assim a importância de material orgânico sobre o solo.

Para cobertura florestal, resultados de fluxo de atravessamento, desenvolvidos por Togashi *et al.* (2012), constataram que há aumento de interceptação com o avanço do estágio sucessional, o que sugere a importância da preservação florestal para garantir interceptação mais eficiente da água da chuva.

Dessa forma, fica evidente que os estudos de fragilidade ambiental proporcionam melhor definição das diretrizes e ações a serem implantadas no espaço físico-territorial, servindo de base para o zoneamento ambiental e fornecendo subsídios à gestão do território (SPÖRL; ROSS, 2004). Bem como pode ser importante ferramenta para avaliações ambientais estratégicas, especialmente em casos de intervenções antrópicas, assim como na definição de áreas prioritárias à conservação ambiental, além de Unidades de Conservação.

A partir da análise conjunta dos dados considerados determinantes no mapeamento da fragilidade ambiental, foi possível perceber a interação que há entre os fatores utilizados como critérios na determinação da fragilidade inerente à bacia hidrográfica. Todavia, é importante considerar que a bacia do rio Jequitinhonha é muito heterogênea, composta por subterritórios distintos que requerem atenção diferenciada, seja por estarem localizados em terrenos com maior declividade, seja por serem essas áreas constituídas de solos mais susceptíveis à erosão, por possuírem menor disponibilidade hídrica, por apresentarem particularidades socioculturais ou a combinação de vários fatores (FERREIRA; SAADI, 2011).

Conforme caracterizado na Tabela 20, elaborou-se uma relação entre os graus de fragilidade ambiental potencial e os possíveis cenários de degradação ambiental dos solos e capacidade de resiliência, bem como apresentou-se propostas de conservação, recuperação e uso sustentável dos recursos.

Observa-se na Tabela 20, que para cada categoria de fragilidade, a susceptibilidade à degradação está dividida em: ‘resistente’ para *Baixa* fragilidade (1), ‘ligeira’ para *Levemente Baixa* (2), ‘moderada’ para *Média* (3), ‘alta’ susceptibilidade para a *Alta* fragilidade (4) e ‘extrema’ susceptibilidade à degradação, para a classe de fragilidade *Extremamente Alta* (5), dando-se a conhecer a possível resistência dos solos para cada cenário de fragilidade, do ponto de vista de estabilidade e instabilidade. Na coluna referente à resiliência, são apresentadas tais capacidades por classe de fragilidade, bem como propostas para recuperação e uso sustentável dos recursos naturais.

São importantes as ações de caráter preventivo, tomadas a partir do conhecimento da fragilidade ambiental, que perpassam pela introdução de técnicas agrícolas e silviculturais que considerem práticas sustentáveis de conservação do solo, prevenção contra incêndios, além de manejo do ecossistema pautado em estratégias de impacto ambiental reduzido, sobretudo o cumprimento dos aspectos legais do novo ‘Código Florestal’ para a conservação da fauna e flora e legislação ambiental inerente.

Neste sentido entende-se que é de suma importância a utilização deste tipo de conhecimento geográfico aqui sintetizado na forma de produto cartográfico, que pode seguramente ser estendido e aperfeiçoado à outras bacias hidrográficas, configurando-se como importante ferramenta para nortear a gestão físico-territorial servindo de base para o desenvolvimento de políticas públicas. Neste sentido, Corte *et al.* (2015) citam a importância de estudos de fragilidade ambiental, uma vez que sua análise é altamente

dependente da escolha dos fatores de ponderação adotados e que requerem aperfeiçoamento com testes e análises mais específicas, além de observações de campo.

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora não seja possível evidenciar a fidedigna condição da fragilidade ambiental potencial real da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha, especialmente por ser um território de heterogêneas unidades de paisagens e por ser uma projeção construída em SIG, pode-se, contudo, fornecer uma base para definição dos locais com maior potencial à degradação ambiental. Neste contexto, esta investigação científica ao indicar o grau de fragilidade natural da bacia, dispõe de base para compreensão de novas investigações de como seriam estes ambientes sobre influência das atividades antrópicas, nomeadamente com a replicação do estudo para a fragilidade ambiental emergente, que considera o fator uso e ocupação do terreno.

Conforme as análises realizadas para identificar as características físicas de cada classe de fragilidade potencial da bacia hidrográfica, assim como pelas constatações em campo realizadas a fim de melhor compreensão das verificações dos resultados, o estudo presta-se a considerar que o método proposto atingiu seus objetivos. Isto verificado pelas cinco categorias de fragilidade potencial que classificaram áreas com características distintas quanto às variáveis analisadas, compondo assim a identificação de locais que apresentam combinações específicas entre os critérios. O método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) mostrou-se eficiente sob análise em comparação par a par entre os critérios, considerando assim as diferentes influências exercidas por cada variável na definição das áreas em fragilidade ambiental. Embora, evidencia-se que, por tratar-se de processo de tomada de decisão, em ambiente participativo, sob julgamento e seleção de alternativas sob pontos de vistas de analistas distintos, que podem ou não concordarem entre si no julgamento, abre-se precedentes quanto ao juízo de valor aplicado para o método. O que, apesar do elevado número de estudos em análises AHP, há ainda uma distância entre resultados da definição de critérios e ponderações na sua efetiva capacidade de representar com alta confiabilidade a relação entre o modelo e a realidade. Isto poderá ser equacionado com a criação de mecanismos metodológicos que promovam protocolos de julgamento para os parâmetros ambientais mais comumente utilizados em fragilidade ambiental, considerando o espaço e domínio a que pertencem.

Os Sistemas de Informações Geográficas, por meio da avaliação multicritério e da álgebra de mapas, demonstraram eficácia na análise teórica da fragilidade ambiental,

atestando a viabilidade de aplicação da metodologia em estudos de planejamento ambiental para bacias hidrográficas. É importante ainda ressaltar que, quanto maior for a incorporação de novos fatores na metodologia de análise, desde que eles estejam relacionados com a determinação da fragilidade ambiental, mais condizentes com a realidade local serão os resultados obtidos. Dessa forma, recomenda-se a avaliação e estudos sobre a incorporação de novos fatores à metodologia original, além daqueles acrescentados neste trabalho.

A maleabilidade da metodologia possibilita ao analista ou planejador ambiental, adaptar novos fatores de acordo com os objetivos almejados para o mapeamento da fragilidade ambiental. Neste estudo, atestou-se a hipótese do trabalho, visto que observou-se a possibilidade de se adaptar o método de Ross (1994) à determinação da fragilidade ambiental em bacia hidrográfica.

Espera-se que a utilização desse estudo possa contribuir, de forma complementar aos aspectos de conservação, proteção e restauração de áreas degradadas, assim como para o ordenamento territorial e a indicação de áreas sob alto estágio de atenção ambiental.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMI, S. F.; COELHO, R. M.; CHIBA, M. K.; MORAES, J. F. L. Environmental fragility and susceptibility mapping using geographic information systems: applications on Ribeirão do Pinhal watershed (Limeira, State of São Paulo). **Acta Scientiarum**, v. 34, n. 4, p. 433-440, 2012.
- ALBANO, F. M.; FECK, E. F. Avaliação Global de Desempenho com Base no *Balanced Scorecard* (Bsc) e *Analytic Hierarchy Process* (AHP): Estudo de Caso em uma Empresa Prestadora de Serviços de Segurança em Máquinas. **Produto & Produção**, n. 17, n.3, p. 51-31, 2016.
- ALMEIDA, C. O.S.; AMORIM, R. S. S.; COUTO, E. G.; ELTZ, F. L. F.; BORGES, L. E. C. Potencial erosivo da chuva de Cuiabá, MT: Distribuição e correlação com a precipitação pluviométrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.2, p.178-184, 2011.
- ALVES, W. S.; SCOPEEL, I.; MARTINS, A. P. Análise da fragilidade ambiental da Bacia do Ribeirão das Abóboras, em Rio Verde, Sudoeste de Goiás. **Geofocus**, n.19, p. 81-108. 2017.

- AMARAL, F. C. S.; SANTOS, H. G.; AGLIO, M. L.D.; DUARDE, M. N.; PEREIRA, N.R.; OLIVEIRA, R. P.; JÚNIOR, W. C. Mapeamento de Solos e Aptidão Agrícola das Terras do Estado de Minas Gerais. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, n. 63, 95p., 2004.
- ARAI, F. K.; GONÇALVES, G. G. G.; PEREIRA, S. B.; COMUNELLO, E.; VITORINO, A.C.T.; DANIEL, O. Espacialização da precipitação e erosividade na bacia hidrográfica do Rio Dourados – MS. **Engenharia Agrícola, Jaboticabal**, v. 30, n.5, p.922-931, 2010.
- BENITES, V. M.; CAIAFA, A. N.; MENDONÇA, E. S.; SCHAEFER, C. E.; KER, J. C. Solos e vegetação nos complexos rupestres de altitude da Mantiqueira e do Espinhaço. **Floresta e Ambiente**, v. 10, n.1, p.76-85, 2003.
- BENITES, V. M.; SCHAEFER, C. E. G. R.; SIMAS, F. N. B.; SANTOS, H. G. Soils associated with rock outcrops in the Brazilian mountain ranges Mantiqueira and Espinhaço. **Revista Brasileira Botânica**, v. 30, p. 569-577, 2007.
- BONNA, J. L. **Mapeamento Pedológico e de Suscetibilidade Erosiva no Alto Córrego Prata (Ouro Preto-MG)**. Dissertação de Mestrado em Geografia na Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 119p., 2011.
- BRASIL. **Lei no 12.651, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis no 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis no 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Disponível em: < [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/ato20112014/2012/lei/L12651compilado.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato20112014/2012/lei/L12651compilado.htm) >. Acesso em: 08/12/2017.
- CÂMARA, G.; SOUZA, R. C. M.; FREITAS, U. M.; GARRIDO, J.; MITSUO II, F. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computers & Graphics**, New York, v. 20, n. 3, p. 395-403, 1996.
- CASTRO, S. S.; HERNANI, L. C. **Solos frágeis: caracterização, manejo e sustentabilidade**. Brasília, DF: Embrapa, 367p. 2015.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Edgard Blücher, 1980.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. **Mapas de Geodiversidade Estaduais**. Disponível em: < <http://www.cprm.gov.br/publique/Gestao->

- [Territorial/Geodiversidade/Mapas-de-Geodiversidade-Estaduais-1339.html](http://www.cprm.gov.br/publique/Geodiversidade/Mapas-de-Geodiversidade-Estaduais-1339.html)>. Acesso em: 02-01-2017.
- CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Atlas pluviométrico do Brasil**. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?infoid=1351&sid=9>>. Acesso em: 10-08-2016
- CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S. de; FILHO, P. H.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 124 p., 2001.
- D'ABREU, A. D. C.; Paisagem e ordenamento do território. **Inforgéo**, n.20-21, p.73-77, 2007.
- DALLA CORTE, A. P.; HENTZ, A. M. K.; DOUBRAWA, B.; SANQUETTA, C. R. Environmental fragility of Iguaçu river watershed, Paraná, Brazil. **Bosque**, v. 32, n.2, p. 287-297, 2015.
- DEODORO, S. C.; FONSECA, B. M. Análise morfométrica e multicriterial da bacia hidrográfica do Rio Santa Bárbara, Nordeste do Quadrilátero Ferrífero (MG). **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 68/9, p. 1837-1852, 2016.
- DUNN, M.; HICKEY, R. The effect of slope algorithms on slope estimates within a GIS. **Cartography**, v. 27, n. 1, p. 9-15., 1998.
- EASTMAN, J. R. Decision Support: Decision Strategy Analysis. In: Clark University (Ed.). **IDRISI Andes Guide to GIS and Image Processing**. Worcester: Clark Labs, 2006.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Agência Embrapa de Informação Tecnológica. (2017): **Solos Tropicais/Argissolos**. Disponível em:<[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos\\_tropicais/arvore/CONTAG01\\_7\\_2212200611538.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONTAG01_7_2212200611538.html)>. (Acesso em 21-08-2017).
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada**. Rio de Janeiro: IBGE / Embrapa Solos, 67p., 2011.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos**. Rio de Janeiro, Reunião Técnica de Levantamento de Solos, 10. Súmula. Rio de Janeiro, SNLCS, 1979.

- EMBRAPA. **O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada**. Rio de Janeiro: IBGE/ Embrapa Solos, 67p., 2011.
- ESRI - Environmental Systems Research Institute. ArcGIS 10.0: GIS by ESRI. **ESRI, 2013**.
- FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Mapa de solos do Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte. (UFV - CETEC – UFLA), 2010. Disponível em: <http://www.feam.br/noticias/1/949-mapas-de-solo-do-estado-de-minas-gerais> e [http://www.dps.ufv.br/?page\\_id=742](http://www.dps.ufv.br/?page_id=742). Acesso em: 10-06-2016.
- FERREIRA, V. O. F.; SAADI, A. Paisagens Culturais da Bacia do Rio Jequitinhonha, em Minas Gerais. **Observatorium**, v.5, n.14, p.2-26, 2013.
- FERREIRA, V. O. **Paisagem, recursos hídricos e desenvolvimento econômico na Bacia do Rio Jequitinhonha, em Minas Gerais**. 313p. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2007.
- FERREIRA, V. O. Unidades de Paisagem da bacia do Rio Jequitinhonha, em Minas Gerais, subsídios para a gestão de recursos hídricos. **Caminhos de Geografia**, v.12, n.37, p. 239-257, 2011.
- FERREIRA, V. O.; SAADI, A. (In) Disponibilidade hídrica e subdesenvolvimento socioeconômico em Unidades de Paisagem da Bacia do Rio Jequitinhonha, em Minas Gerais. **Caminhos de Geografia**, v. 12, n.40, p. 166-180, 2011.
- FERREIRA, V. O.; SILVA, M. M. O Clima da Bacia do Rio Jequitinhonha, em Minas Gerais: Subsídios para a Gestão de Recursos Hídricos. **Revista Brasileira de Geografia Física**. V.2, p. 303-319, 2012.
- FITZ, P. R. **Geoprocessamento sem complicação**. São Paulo: Oficina de Textos, 160 p. 2008.
- FONSECA, B. M.; AUGUSTIN, C. H. R. R. Análise morfométrica de bacias de drenagem e sua relação com a estruturação geológica, Serra do Espinhaço Meridional – MG. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 15, n.2, p.153-172, 2014.
- FRANÇA, L. C. J.; PIUZANA, D.; ROSS, J. L. S. Fragilidade Ambiental Potencial e Emergente em núcleo de desertificação no semiárido brasileiro (Gilbués, Piauí). **Revista Espacios (Caracas)**, v. 38, n. 31, 2017.
- FRANÇA, L. C. J.; PIUZANA, D.; MORAIS, M.S. **Fragilidade Ambiental Potencial e Emergente aplicada ao município de Capelinha e à RPPN Fazenda Fartura, MG**.

- In: PEREIRA, I. M. (Org.). Invasão Biológica em áreas de Mata Atlântica: os desafios para conservação, controle e restauração florestal. 2018. (*In press*)
- FREITAS, A.J.; SILVA, D.D.; PRUSKI, F.F.; PINTO, F.A.; PEREIRA, S.B.; GOMES FILHO, R.R.; TEIXEIRA, A.F.; BAENA, L.G.N.; MELLO, L.T.A.; NOVAES, L.F. **Equações de chuvas intensas no Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Companhia de Saneamento de Minas Gerais; Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 65 p. 2001.
- FUSHITA, A. T.; BORTOLIN, L. H. G. C.; ARANTES, E. M.; MOREIRA, M. A. A.; CANÇADO, C. J.; LORANDI, R. Fragilidade Ambiental Associada ao Risco Potencial de Erosão de Uma Área da Região Geoeconômica Médio Mogi Guaçu Superior (SP), **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 63, n.4, p.477-488, 2011.
- GARFI, M.; TONDELLU, S.; BONOLI, A. Multi-criteria decision analysis for waste management in Saharawi refugee camps. **Waste Management**, v. 29, 2009.
- GASTON, K. J.; PRESSEY, R. L.; MARGULES, C. R. Persistence and vulnerability: retaining biodiversity in the landscape and in protected areas. **Journal of Biosciences**. V.27, n.4, p. 361-384, 2002.
- GIANUCA, K.; TAGLIANI, C.R.A. GIS analysis of landscape changes in environments adjacent to pinus forests in district of Estreito, São José do Norte, Brazil. **Journal of Integrated Coastal Zone Management**. N.12 V.1, 2012.
- GONÇALVES, G. G. G.; DANIEL, O.; COMUNELLO, E.; VITORINO, A. C. T.; ARAI, F. K. Determinação da fragilidade ambiental de bacias hidrográficas. **Floresta**, v. 41, n.4, p. 797 – 808, 2011.
- GONÇALVES, G.G.G.; DANIEL, O.; COMUNELLO, E.; VITORINO, A.C.T.; ARAI, F. K. Determinação da fragilidade ambiental de bacias hidrográficas. **Floresta**, v.41, n.4, p.797-808, 2011.
- GONÇALVES, S. R. A.; ARAÚJO, R. R.; IMAI, N. N. Mapeamento do Grau de Fragilidade com Processo Analítico Hierárquico e operadores Fuzzy Gama na detecção de áreas de fragilidade ambiental. **Revista Brasileira de Cartografia**, n.68, ed. 2, p. 327-337, 2016.
- GONTIJO, B. M. Uma geografia para a Cadeia do Espinhaço. **Megadiversidade**, v.4, n.1-2, 2008.
- GRANDZOL, J. R. Improving the faculty selection process in higher education: a case for the analytic hierarchy process. **IR Application**, v.6, p.1-13, 2005.



- GRANELL-PÉREZ, C. **Trabalhando geografia com as cartas cartográficas**. Editora Unijuí. 2ª Edição, 128p. 2004.
- GUIMARÃES, D. P.; REIS, R. J.; LANDAU, E. C. Índices Pluviométricos em Minas Gerais. **Embrapa Milho e Sorgo**, 88p. Série 30, 2010.
- HENGL, T.; GRUBER, S.; SHRESTHA, D. P. Reduction of errors in digital terrain parameters used in soil-landscape modelling. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.5, p.97-112, 2004.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Diretoria de Geociências. **Diagnóstico ambiental da bacia do rio Jequitinhonha**: diretrizes gerais para a ordenação territorial. Salvador: IBGE, 1997. Disponível em: <<http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv95902.pdf>>.
- IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Relatório de monitoramento das águas superficiais na Bacia do Rio Jequitinhonha em 2004**. Instituto Mineiro de Gestão das Águas. Belo Horizonte, 167p., 2005.
- IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Relatório Diagnóstico dos Afluentes do Médio e Baixo Jequitinhonha**. 949 p., 2013. Disponível em:<<http://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/publicacoes-tecnicas/bacia-hidrografica-do-rio-jequitinhonha/upgrhjq3medio-e-baixo-rio-jequitinhonha/8867-diagnostico>>. Acesso em: 10/11/2017.
- INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Spring**, v. 4.1.1. < Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/analise.html>>, 2005.
- INSTITUTO PRÍSTINO. **Atlas Digital Geoambiental: Sistema WebGis de livre acesso ao banco de dados ambiental**. Disponível em: <http://institutopristico.org.br/atlas/>. Acesso em: 05/07/2016.
- JÚNIOR, V. S. Q.; CABRAL, J.B.P.; ROCHA, I. R.; BARCELOS, A. A. Uso de geotecnologias na caracterização da fragilidade ambiental da bacia a UHE Foz do Rio Claro (GO). **Geofocus**, n.15, p. 193-212, 2015.
- KARLSSON, C. S. J.; KALANTARI, Z.; MORTBERG, U.; OLOFSSON, B.; LYON, S. W. Natural Harzard Susceptibility Assessment for Road Planning Using Spatial Multi-Criteria Analysis. **Environmental Management**, v. 60, p. 823-851, 2017.
- LAL, R. Degradation and resilience of soils. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, London, v. 352, p. 997-1010, 1997.

- LOMBARDI NETO, F. & BERTONI, J. **Tolerância de perdas de terra para solos do estado de São Paulo**. Campinas, Instituto Agrônômico, (Boletim Técnico, 28), 12p., 1975.
- LOPES, F. A.; PIUZANA, D.; LEITE, V. A.; MILAGES, A R. Análise da influência litológica e estrutural a partir de métodos morfométricos em segmentos de drenagem na porção cimeira da Bacia Hidrográfica do Rio Jequitinhonha, MG. **Caminhos de Geografia**, v. 17, n.58, p. 136-153, 2016.
- LUEDELING, E.; SIEBERT, S.; BUERKERT, A. Filling the voids in the SRTM elevation model - A TIN - based delta surface approach. **Photogrammetry & Remote Sensing**. V. 62, p.283-294, 2007.
- MANGANHOTTO, R. F.; SANTOS, L. J. C.; FILHO, P.C.O. Analise da fragilidade ambiental como suporte ao planejamento do ecoturismo em unidades de conservação: estudo de caso Flora de Iratí - PR. **Floresta**. v.41, n.2, p,231-243, 2011.
- MARTINS, F. C M.; ANDRADE, L. C. R.; CALIJURI, M. L.; BARROS, K. O.; BARRETO, E. M. Multicriteria analysis and geoprocessing for conservation of unpaved roads. **Revista de Ciências Agrárias de Portugal**. V.37, n.2, p. 162-170, 2014.
- MASSA, E. M.; ROSS, J. L. S. Aplicação de um modelo de fragilidade ambiental relevo-solo na Serra da Cantareira, bacia do Córrego do Bispo, São Paulo - SP. **Revista do Departamento de Geografia – USP**. v.24, p. 57-79, 2012.
- MELLO, C. R. DE; LIMA, J. M.; SILVA, A. M.; MELLO, J. M.; SILVA, M. S. Krigagem e Inverso do Quadrado da Distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, n.5, p.925-933, 2003.
- METZGER, J. P. O que é ecologia de paisagens? **Biota Neotrópica**, v.1, n.1/2, 2001.
- MIARA, M. A.; OKA-FIORI, C. Análise por múltiplos critérios para a definição de níveis de fragilidade ambiental – um estudo de caso: bacia hidrográfica do rio Cará-Cará, Ponta Grossa/PR. **RA'E GA**, n. 13, p. 85-98, 2007.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca (PAN – Brasil). **Edições MMA**, 242p. Disponível em:<[http://www.mma.gov.br/estruturas/sedr\\_desertif/\\_arquivos/pan\\_brasil\\_portugues.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/sedr_desertif/_arquivos/pan_brasil_portugues.pdf)>. 2005.

- MIRANDA, E. E. (Coord.). **Brasil em Relevô**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 14/01/2017.
- MITTERMEIER, R. A.; GIL, P.R.; HOFFMAN, M.; PILGRIM, J.; BROOKS, T.; MITTERMEIER, C. G.; LAMOREUX, J.; FONSECA, G. A. B. **Hotspots revisited: earth's biologically richest and most endangered terrestrial ecoregions**. Cemex, Conservation International, Agrupación Sierra Madre., Mexico City. 392 p. 2004.
- MIYATA, S.; KOSUGI, K. I.; GOMI, T.; MIZUYAMA, T. Effects of forest floor coverage on overland flow and soil erosion on hillslopes in Japanese cypress plantation forests. **Water Resources Research**, v. 45, n.6, p.1-17., 2009.
- MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca (PAN – Brasil). **Edições MMA**, 242p. Disponível em: <[http://www.mma.gov.br/estruturas/sedr\\_desertif/arquivos/pan\\_brasil\\_portugues.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/sedr_desertif/arquivos/pan_brasil_portugues.pdf)>. 2005.
- MYERS, N.; MITTERMEIER, R. A.; MITTERMEIER, C. G.; FONSECA, G. A.B.; KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, n.403, p. 853-858, 2000.
- NOVAIS, M. P. S. **Análise espacial de bacias hidrográficas a partir de SIG: um estudo da bacia hidrográfica do Itapicuru – Bahia**. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. 2015, João Pessoa. Anais eletrônicos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2015.
- OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B. B.; ALVES SOBRINHO, T.; PANACHUKI, E. Processo Analítico Hierárquico aplicado a vulnerabilidade natural a erosão. **Geociências**, v.28, n.4, p. 417-424, 2009.
- OLIVERIA, F. P.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; SILVA, M. A.; MELLO, C. R. Potencial erosivo da chuva no vale do rio doce, região centro leste do estado de Minas Gerais – primeira aproximação. **Ciênc. Agrotec.** Vol.33, n.6, p. 1569-1577, 2009.
- PADILHA, D. G.; TREVISAN, M. L.; CRUZ, J. C. Sensibilidade do modelo de fragilidades ambientais à ponderação multicriterial: aspectos físicos da bacia hidrográfica do alto Uruguai. **Floresta**, v. 44, n. 3, p. 535-548, 2014.
- PANAGOS, P.; BORRELLI, P.; MEUSBURGER, K.; YU, B.; KLIK, A.; LIM, K. J.; YANG, J. E.; NI, J.; MIAO, C.; CHATTOPADHYAY, N.; SADEGHI, S. H.; HAZBAVI, Z.; ZABIHI, M.; LARIONOV, G. A.; KRASNOV, S. F.; GOROBETS, A.

- V.; LEVI, Y.; ERPUL, G.; BIRKEL, C.; HOYOS, N.; NAIPAL, V.; OLIVEIRA, P. T. S.; BONILLA, C. A.; MEDDI, M.; NEL, W.; DASHTI, H. A.; BONI, M.; DIODATO, N.; OOST, K. V.; NEARING, M.; BALLABIO, C. Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. **Scientific Reports – Nature**. v. 7, n. 1, p. 4175, 2017.
- PEREIRA, H. M.; LEADLEY, P.W.; PROENÇA, V.; ALKEMADE, R.; SCHARLEMANN, J. P.W.; MANJARRÉS, J. F. F.; ARAÚJO, M.B.; VALVANERA, P.; BIGGS, R.; CHEUNG, W. L.; CHINI, L.; COOPER, D.; GILMAR, E.; GUÉNETTE, S.; HURTT, G. C.; HUNTINGTON, H. P.; MACE, G. M.; OBERDORFF, T.; REVENGA, C.; RODRIGUES, P.; SCHOLE, R. J.; SUMAILA, U.R.; WALPOLE, M. Scenarios for Global Biodiversity in the 21<sup>st</sup> Century. **Science**, v.330, p.1496-1501, 2010.
- PINTO, F. T.; PENTAN, S.; MIKOS, M. BARBOSA, J. P. Application of GIS tools for Leça River Basin soil erosion (Northern Portugal) evaluation. **WIT Transactions on Ecology and the Environment**. v. 124, p. 267-278, 2009.
- PIRANI, J.R., MELLO-SILVA, R., GIULIETTI, A.M. Flora de Grão Mogol, Minas Gerais, Brasil. **Bol. Botânica da Univ. São Paulo**, v. 21, p.1–24, 2003.
- PTDRS – Plano Territorial de Desenvolvimento Rural Sustentável do Alto Jequitinhonha. **Grupo Gestor Territorial (CIAT)**. 290 p., 2006. Disponível em: <[http://sit.mda.gov.br/download/ptdrs/ptdrs\\_territorio005.pdf](http://sit.mda.gov.br/download/ptdrs/ptdrs_territorio005.pdf)>. Acesso em: 10/11/2017.
- QUADROS, F. R. **Caracterização e análise da fragilidade ambiental da Floresta Nacional de Passo Fundo (Mato Castelhana, RS)**. (Tese de Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de São Carlos. 85p., 2014.
- QUARTAROLI, C. F.; ARAÚJO, L. S. **Ordenamento Territorial e Zoneamento**. In: TÔSTO, S. G.; RODRIGUES, C. A. G.; BOLFE, E. L.; BATISTELLA, M. Geotecnologias e Geoinformação. Brasília. DF: Embrapa, 248p., 2014
- QUARTAROLI, C. F.; ARAÚJO, L. S.; GARÇON, E. A. M. **Carta de vulnerabilidade natural à perda de solo do Estado do Maranhão**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite. 44p., 2013.
- RAPINI, A.; RIBEIRO, P. L.; LAMBERT, S.; PIRANI, J. R. A flora dos campos rupestres da Cadeira do Espinhaço. **Megadiversidade**, v. 4, n.1-2, 2008.

- RIBEIRO, K.T. & FREITAS, L. Potential impacts of changes to Brazilian Forest Code in campos rupestres and campos de altitude. **Biota Neotropica**, v.10, n.4. 2010.
- RIGHI, E.; BASSO, L. A. Aplicação e análise de técnicas de interpolação para espacialização de chuvas. **Ambiência Guarapuava**, v. 12, n.1, p. 101-117, 2016.
- ROSA, M.R.; ROSS, J. L. Aplicação de SIG na geração de cartas de fragilidade. **Revista do Departamento de Geografia**, n.13, 1999.
- ROSS, J. L. S. Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizado. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo - SP, n. 8, p.24-30, 1994.
- ROSS, J. L. S. Landforms and environmental planning: Potentialities and Fragilities. **Revista do Departamento de Geografia - USP**, vol. esp. p.38-51, 2012.
- SÁ JÚNIOR, A. **Aplicação da classificação de Köppen para o zoneamento climático do estado de Minas Gerais**. 101p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola, Engenharia de Água e Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. 2009.
- SAATY, T. L. How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. **European Journal of Operational Research**, v.48, p. 9 – 26, 1990.
- SAATY, T. L. **Método de análise hierárquica**. São Paulo: Makron Books, 1991.
- SAATY, T. L. Theory and Applications of the Analytic Network Process: Decision Making with Benefits, Opportunities, Costs, and Risks. **Pittsburgh: RWS Publications**, 2005.
- SAATY, T.L. An exposition of the AHP in reply to the paper ‘remarks on the analytic hierarchy process’. **Management Science** v.36, 259 - 268, 1990.
- SAATY, T.L. **The Analytic Hierarchy Process**. McGraw Hill International, New York, 1980.
- SAATY, T.S. Decision making with the analytic hierarchy process. **International Journal of Services Sciences**. v. 1, n.1, 2008.
- SALLUN, A. E. M.; FILHO, W. S.; KARMANN, I. Diagnóstico do meio físico da bacia hidrográfica do Rio Congonhas, MG. **Geonomus**, v.16, n.1, p.37-50, 2008.
- SANTANA, M. O. **Atlas das áreas susceptíveis à desertificação do Brasil**. Ministério do Meio Ambiente (MMA), 134 p. Disponível em: <<http://unesdoc.unesco.org/images/0015/001595/159542POR.pdf>>. 2007.
- SANTOS, C. A.; SOBREIRA, F. G. Análise da Fragilidade e Vulnerabilidade natural dos terrenos aos processos erosivos como base para o ordenamento territorial: o caso das

- bacias do córrego carioca, córrego do bação e ribeirão carioca na região do alto Rio das Velhas-MG. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.9, n.1, p. 65-73, 2008.
- SANTOS, L. F.; CRUZ, R. B. C. O uso do método AHP na tomada de decisão para seleção de lajes de edifícios comerciais. **Engenharia, Estudo e Pesquisa ABPE**, v. 13, n.1, p 39-52, 2013.
- SANTOS, R. M.; NÓBREGA, M. T.; PAIVA, R. G.; SILVEIRA, H. Análise da fragilidade ambiental no município de Tamboara - PR: Aplicação e Estudo comparativo de duas metodologias. **Geoambiente**, n.14, p. 93-120, 2010.
- SCHIAVO, B. N.V.; HENTZ, A. M.K.; DALLA CORTE, A. P.; SANQUETTA, C. R. Caracterização da fragilidade ambiental de uma bacia hidrográfica urbana no município de Santa Maria – RS. **Rev. Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Santa Maria, v.20, n.1, p.464-473, 2016.
- SCHIMIDT, M. A. R.; BARBOSA, G. R. Uso de redes neurais artificiais na ponderação inicial da técnica AHP em análises de vulnerabilidade de bacias hidrográficas. **Bol. Ciênc. Geod.** V. 22, n.3, p. 511-525, 2016.
- SCOLFORO, J.R.S; CARVALHO, L.M.T; OLIVEIRA, A.D. **Zoneamento Ecológico-Econômico de Minas Gerais – componentes geofísico e biótico**. Lavras: Editora UFLA, 2008.
- SCOPEL, I.; SOUSA, M. S.; MARTINS, A. P. Infiltração de água e potencial de uso de solos muito arenosos nos cerrados (Savanas) do Brasil. **Boletim Goiano de Geografia**, v.33, n.2, p. 203-219, 2013.
- SILVA, D. M. R. **Aplicação do Método AHP para Avaliação de Projetos Industriais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 128 p., 2007.
- SILVA, L. F.; MLENEK, D. C.; LEANDRO, D.; QUADRO, M.S.; ROCHA, F.C.; NADALETI, W.C.; CASTRO, A.S. Índices de fragilidade ambiental parciais da bacia do Rio Iraizinho. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**. v.1, n.3, p.17-32, 2016.
- SILVA, M C. G. **Utilização do método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) para localização de usina de reciclagem de resíduos da construção civil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, 83p., 2012. Disponível em:<  
<http://www.pg.utfpr.edu.br/dirppg/ppgep/dissertacoes/arquivos/203/Dissertacao.pdf>>.

- SILVA, V. C. B.; MACHADO, P. S. SIG na análise ambiental: susceptibilidade erosiva na bacia hidrográfica do Córrego Mutuca, Nova Lima – Minas Gerais. **Revista de Geografia**, v. 31, n.2, 2014.
- SILVA, W. G.; MACHADO, V. M.; CHAGAS, M. V. S.; FLORES, W.M.F. Susceptibilidade a erosão utilizando o processo de análise hierárquica (AHP) e sistema de informação geográfica. **Cerrado Agrociências**. V.7, p.66-78, 2016.
- SOARES, M. R. G.; SOUZA, J. L. M.; JERSZURKI, D. Fragilidade Ambiental da Bacia do Rio Pequeno em São José dos Pinhais (PR). **Revista Geografia (Londrina)**. v. 20, n.3, p. 057-070, 2011.
- SPÖRL, C.; CASTRO, G.E.; LUCHIARI, A.; Aplicação de Redes Neurais Artificiais na Construção de Modelos de Fragilidade Ambiental, **Revista do Departamento de Geografia – USP**, v.21, p.113-135, 2011.
- SPÖRL, C.; ROSS, J.L.S. Análise comparativa da Fragilidade Ambiental com Aplicação de Três Modelos. **GEOUSP - Espaço e Tempo**. (15), 39-49, 2004.
- STRAHLER, A.N. Hypsometric analysis of erosional topography. **Bull. Geol. Soc. Am.**, 63:111-1141, 1952.
- STRAHLER, A.N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. **Bulletin of the Geological Society of America**, v. 63, p.1.117-1.142, 1952.
- STRECK, E. V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; SCHNEIDER, P. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: EMATER/RS; UFRGS, 2002.
- TAMANINI, M. S. A. **Diagnóstico físico-ambiental para determinação da fragilidade potencial e emergente da Bacia do Baixo Curso do Rio Passaúna em Araucária – PR**. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba (PR), 105f., 2008.
- TERRA, L. G.; SCHIAVO, B. N. V.; BORBA, W. F.; DUARTE, M. M. Geoprocessamento algébrico utilizado na caracterização da fragilidade do município de Santiago – RS. **Revista Caminhos de Geografia**, v. 17, n.57, p. 167-174, 2016.
- TOGASHI, H. F. MONTEZUMA, R. C. M.; LEITE, A. F. Precipitação incidente e fluxo de atravessamento das chuvas em três estágios sucessionais de floresta atlântica no maciço da Pedra Branca, Rio de Janeiro. **Revista Árvore**, v. 36, n.5, p. 907-917, 2012.

- TONELLO, K. C.; DIAS, H. C. T.; SOUZA, A. L.; RIBEIRO, C. A. A. S.; LEITE, F. P. Morfometria da bacia hidrográfica da cachoeira das Pombas, Guanhães – MG. **Revista Árvore**, v.30, n.5, p.849-857, 2006.
- TRAFICANTE, D. P.; CAMPOS, S.; MANZIONE, R. L; RODRIGUES, B. Fragilidade Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Capivara, Botucatu – SP. **Revista Energia na Agricultura**, v.32, n.1, p.88-95, 2017.
- TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: FIBGE, Secretaria de Planejamento da Presidência da República, 1977.
- VALENTE, R. O. A.; VETORAZZI, C. A. Análise da estrutura da paisagem na Bacia Corumbataí, SP. **Scientia Forestalis**, n 62, p. 114-129, 2002.
- VALENTE; R. O. A.; VETTORAZI, C. A. Comparison between methods of multi-criteria evaluation, in a GIS environment, aiming at forest conservation and preservation. **Scientia Forestalis**, n.69, p.51-61, 2005.
- VALLE, I. C.; FRANCELINO, M. R.; PINHEIRO, H. S. K. Mapeamento da fragilidade ambiental na Bacia do Rio Aldeia Velha, RJ. **Floram**, 23 (2), p. 295-308, 2016.
- VASHCHENCKO, Y.; FAVARETTO, N.; BIONDI, D. Fragilidade ambiental nos picos Camacua, Camapuã e Tucum, Campina Grande do Sul, PR. **Floresta**, v. 37, n. 2, 2007.
- VITTE, A. C.; MELLO, J. P. Mapeamento da fragilidade ambiental na bacia do rio Verde, Região Nordeste do estado de São Paulo, Brasil. **GEOUSP – Espaço e Tempo**, n.35, p. 192-222, 2013.
- VITTE, A. C.; VILELA FILHO, L. R. A urbanização, a fragilidade potencial do relevo e a produção do risco na bacia hidrográfica do Córrego Proença, município de Campinas, Brasil. **Territorium: Rev. Portuguesa de riscos, prevenção e segurança**. n. 13, p. 105-114, 2006.